



**Elena Nikolaevna Baikova**

Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

## **Transferência de Energia sem Contacto: Estudo das Emissões do Campo Elétrico**

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadores: Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev,  
Professor Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa  
Doutor Mário Rui Melício da Conceição,  
Professor Auxiliar com Agregação, Universidade de Évora  
Doutor Vítor Manuel Fernão Pires,  
Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Setúbal

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos de Palma Goes

Arguentes: Prof. Doutor João Luís Afonso  
Prof. Doutor Duarte de Mesquita e Sousa

Vogais: Prof. Doutor João Carlos de Palma Goes  
Prof. Doutor Vítor Manuel Fernandes Mendes  
Prof. Doutor Fernando José Almeida Vieira do Coito  
Prof. Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev  
Prof. Doutor Hugo Miguel Inácio Pousinho



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março, 2018**



## **Transferência de Energia sem Contacto: Estudo das Emissões do Campo Elétrico**

Copyright © Elena Nikolaevna Baikova, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Resumo

*O aumento do valor da energia transferida e da distância da transferência tornou importante a questão de limitação das emissões eletromagnéticas irradiadas pelo sistema de transferência de energia sem contacto que podem afetar de forma adversa os seres vivos, os equipamentos eletrónicos e o canal de comunicação. Este trabalho é uma contribuição para o estudo da componente elétrica do campo eletromagnético irradiado pelo sistema de transferência de energia sem contacto para o ambiente envolvente. A transferência de energia sem contacto e a transmissão de dados sem fio são estudadas simultaneamente, com enfoque sobre o canal de comunicação sem fios adequado, que permite melhorar a comunicação entre o transmissor e o recetor. É estudado o impacto das emissões eletromagnéticas irradiadas sobre os seres vivos e sobre o canal de comunicação. O estudo está focado na intensidade e na distribuição da componente elétrica do campo eletromagnético produzido pelo sistema de transferência de energia com enfoque nos níveis de segurança na exposição ao campo elétrico, recorrendo aos modelos computacionais desenvolvidos utilizando o método dos elementos finitos. Para a validação experimental dos modelos computacionais são realizadas medições dos níveis do campo elétrico produzido pelo sistema. Os resultados experimentais são comparados com as normas de segurança estabelecidas pelos organismos internacionais para a verificação da compatibilidade eletromagnética. É implementado um protótipo experimental de transferência de energia sem contacto que opera simultaneamente com uma transmissão de dados sem fio. É desenvolvida uma aplicação computacional que permite sintonizar o modo de funcionamento do protótipo para o regime de ressonância.*

# Palavras-chave

*Transferência de Energia sem Contacto*

*Canal de Transmissão de Dados*

*Acoplamento Indutivo Ressonante*

*Emissões Eletromagnéticas*

*Modelação e Simulação*

*Protótipo Experimental*

*Aplicação computacional*

# Wireless Energy Transfer: Study of Electric Field Emissions

## Abstract

*The increased level of the wirelessly transmitted energy and the increased distance of transmission turned important to limit the electromagnetic emissions radiated by the wireless energy transfer system, as the electromagnetic field may adversely affect the living beings, the electronic equipment and the communication channel. This work is a contribution to the study of the electrical component of the electromagnetic field, radiated by the wireless energy transfer system into the adjacent environment. The wireless energy transfer and the wireless data transfer are studied simultaneously, focusing on the appropriate wireless communication channel between the transmitter and the receiver, so to make that channel improved. The impact of the radiated electromagnetic emissions on both living beings and the communication channel is studied, as well as the strength and the distribution of the electric component of the electromagnetic field produced by the wireless energy transfer system. The study is focussed at the safety levels in the exposure to the electric field, using computational models developed upon the finite element method. For the experimental validation of the computational models, measurements of the electric field level produced by the wireless energy transfer system, are made. The experimental results are compared to the safety standards established by the international organisms, in order to verify the electromagnetic compatibility. An implementation of a wireless energy transfer experimental prototype that operates simultaneously with a wireless data transmission is assembled. A computational application that allows to tune the operational frequency of the prototype to correspond to the resonant mode operation, is developed.*

# Keywords

*Wireless Energy Transfer*

*Data Transmission Channel*

*Magnetic Resonance Coupling*

*Electromagnetic Emissions*

*Modeling and Simulation*

*Experimental Prototype*

*Computational application*



# Agradecimentos

*Ao Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade Nova de Lisboa, meu orientador, pela abertura de espírito revelado desde o primeiro contacto, pela competência científica, pela sua disponibilidade, pelo encaminhamento para o tema tratado nesta dissertação e pelas críticas e sugestões feitas durante a orientação. Agradeço também pela compreensão, pelo apoio incondicional e pela amizade.*

*Ao Doutor Mário Rui Melício da Conceição, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Física da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora, orientador em regime de coorientação científica, desejo expressar um agradecimento muito especial por ter aceite fazer parte da equipa de orientação e por dinamizar este trabalho, pela amizade e pelo seu profundo empenho, incentivo e inestimável ajuda ao longo deste percurso. Agradeço também as sugestões, críticas, paciência e acima de tudo total disponibilidade.*

*Ao Doutor Vítor Manuel de Carvalho Fernão Pires Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal o meu profundo agradecimento pela assistência dada em regime de coorientação científica, pela ajuda, disponibilidade e bons conselhos que sempre deu e pela amizade.*

*Aos colegas Doutora Luísa Caeiro e Mestre Manuel Ferreira pelos conselhos e ajuda prestada na realização de medições experimentais. Aos colegas e amigos Doutora Svetelana Chemetova, Doutor Alexandre Magrinho, Doutor António Roque, Doutor José Maia, Doutor António Pombo, Doutora Natália Rosa, Doutor*

*Armando Pires, Doutor Daniel Foito, Doutor José Luís Sousa, Doutora Dulce Costa, Doutor Silviano Rafael, Doutor Pedro Lobato pela amizade e palavras de incentivo.*

*Ao meu colega de doutoramento Luís Romba Jorge desejo expressar o meu profundo agradecimento pelo apoio, conselhos e colaboração em trabalhos de investigação.*

*À Universidade Nova de Lisboa por me ter recebido no seu programa doutoral.*

*À Escola Superior de Tecnologia de Setúbal pelo apoio recebido.*

*Aos colegas Doutora Anastassia Krusteva e Mestre Georgy Gigov pela colaboração e realização de medições experimentais na Universidade Técnica de Sofia.*

*Ao Doutor Bernd Jaekel, Diretor Técnico de EMC Center of Siemens Group, pelos conselhos e sugestões, mesmo que à distância.*

*Às minhas filhas e ao meu marido pela paciência, compreensão e apoio, sem os quais não teria chegado ao final desta etapa da minha vida e a quem espero poder compensar os momentos em que não tive a possibilidade de estar presente.*

*Aos outros membros da minha família e aos amigos, especialmente aos meus pais, a quem privei de muitas horas de merecida atenção e que sempre me incentivaram e aguardavam pacientemente a conclusão deste trabalho, desejo expressar meu profundo agradecimento pelo apoio e pela força que me deram.*

*A todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho o meu agradecimento.*

# Índice

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento e Motivação	2
1.2	Transferência de Energia sem Contacto	4
1.2.1	Questões e hipóteses de investigação	12
1.2.2	Abordagem	15
1.3	Contribuições originais	18
1.4	Publicações	20
1.5	Organização do Texto	23
1.6	Notação	25
<b>Capítulo 2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>26</b>
2.1	Introdução	27
2.2	Acoplamento Indutivo Ressonante	27
2.3	Transferência de Energia e Transmissão de Dados	36
2.3.1	Métodos de transmissão de dados nos sistemas de TESC	36
2.3.2	Transferência de energia e transmissão de dados na indústria	39
2.4	Emissões Eletromagnéticas	42
2.5	Avaliação das Emissões EM dos Sistemas de TESC	46
2.6	Conclusões	50
<b>Capítulo 3</b>	<b>Impacto das Emissões Eletromagnéticas Irradiadas</b>	<b>51</b>
3.1	Introdução	52
3.2	Radiação Eletromagnética	53
3.2.1	Ondas eletromagnéticas	53
3.2.2	Espetro eletromagnético	54
3.2.3	Campo próximo e campo distante	56

3.3	Impacto do Campo Eletromagnético sobre Saúde	59
3.3.1	Efeito sobre o corpo humano	59
3.3.2	Regime regulatório de sistemas de TESC	64
3.3.3	Limites de segurança na exposição à radiação EM	66
3.3.4	Níveis de referência da exposição à radiação EM	69
3.4	Impacto do Campo EM sobre o Canal de Dados	73
3.4.1	Efeito sobre o canal dos dados	74
3.4.2	Seleção do protocolo de transmissão de dados	75
3.4.3	Sensibilidade do canal de transmissão de dados	79
3.5	Conclusões	79
<b>Capítulo 4</b>	<b>Modelação e Implementação do Protótipo</b>	<b>81</b>
4.1	Introdução	82
4.2	Modelação Elétrica	83
4.3	Desenho do sistema de TESC	86
4.4	Modelação para Casos de Estudo 1 e 2	88
4.4.1	Caso de Estudo_1	88
4.4.2	Caso de Estudo_2	92
4.5	Implementação do Protótipo Experimental	97
4.6	Aplicação Computacional	105
4.7	Conclusões	110
<b>Capítulo 5</b>	<b>Resultados</b>	<b>112</b>
5.1	Introdução	113
5.2	Simulação Computacional	114
5.2.1	Caso de Estudo_1	115
5.2.2	Caso de Estudo_2	119
5.3	Resultados Experimentais	123
5.3.1	Caso de Estudo_1	125

5.3.2	Caso de Estudo_2	128
5.3.3	Impacto das emissões EM sobre o canal de dados	133
5.4	Caso de Estudo_3 – Protótipo Experimental	135
5.5	Discussão dos Resultados	139
5.6	Conclusões	143
<b>Capítulo 6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>145</b>
6.1	Conclusão	146
6.2	Linhas de Investigação Futura	148
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>149</b>
<b>Anexo 1</b>	Organizações envolvidas na elaboração de normas	176
<b>Anexo 2</b>	Introdução ao Método dos Elementos Finitos	179
<b>Anexo 3</b>	Modelação Eletromagnética	181

# Lista de Figuras

Figura 1.1	Métodos de transferência de energia sem contacto	6
Figura 1.2	Configuração simplificada de TESC por acoplamento indutivo ressonante	8
Figura 2.1	Diferentes mecanismos de acoplamento: (a) acoplamento indutivo não ressonante; (b) acoplamento indutivo ressonante com baixo $Q$ ; (c) acoplamento indutivo ressonante com alto $Q$	28
Figura 2.2	Desdobramento das frequências	34
Figura 2.3	Configuração simplificada do sistema de TESC com o ajuste da frequência	35
Figura 2.4	Configuração das bobinas para TESC e TDSF	37
Figura 2.5	Sistema de TESC com comunicação bidirecional	39
Figura 2.6	Sistema de TESC e de TDSF proposto por A4WP	41
Figura 2.7	Blindagens: (a) condutora; (b) com escudo magnético, (c) escudo ativo; (d) escudo reativo	44
Figura 2.8	Distribuição do campo magnético simulado: (a) sem escudo reativo ressonante; (b) com escudo reativo ressonante	49
Figura 3.1	Onda eletromagnética plana	53
Figura 3.2	Espetro eletromagnético	54
Figura 3.3	Distância de transição (campo próximo - campo distante)	58

Figura 3.4	Corpo exposto a um campo elétrico vertical uniforme de 10 kV/m a 60 Hz	61
Figura 3.5	Correntes induzidas num corpo humano por um campo magnético	62
Figura 3.6	Processos fisiológicos resultantes da exposição a campos EM	63
Figura 3.7	Especificação das restrições básicas dentro do corpo	67
Figura 3.8	Níveis de referência para a exposição ocupacional e do público em geral [ICNIRP98]	70
Figura 3.9	Níveis de referência da ICNIRP e do IEEE para público em geral	70
Figura 3.10	Níveis de referência para a exposição ocupacional e do público em geral [ICNIRP10]	72
<hr/>		
Figura 4.1	Esquema do sistema de TESC	82
Figura 4.2	Circuito equivalente do sistema de TESC	84
Figura 4.3	Diagrama do sistema de TESC	86
Figura 4.4	Esquema elétrico do sistema de TESC	87
Figura 4.5	Forma de onda de tensão na entrada do circuito de Tx	88
Figura 4.6	Configuração do protótipo: Caso de Estudo_1	88
Figura 4.7	(a) Bobina espiral plana do Tx e Rx; (b) Modelo simplificado	89
Figura 4.8	Domínio de estudo para o modelo 2D: Caso de Estudo_1	90
Figura 4.9	Modelo em 3D: Caso de Estudo_1	91
Figura 4.10	(a) Malha dos elementos finitos do modelo; (b) Detalhe de malha na região de bobinas	91
Figura 4.11	Condições de fronteira para modelo 2 D: Caso de Estudo_1	92

Figura 4.12	Configuração das bobinas e do protótipo: Caso de Estudo_2	93
Figura 4.13	Visão 3D de bobinas Tx (a) e Rx (b)	93
Figura 4.14	Domínio de estudo para o modelo 2D do Caso de Estudo_2	94
Figura 4.15	(a) Malha dos elementos finitos do modelo; (b) Detalhe de malha na região de bobinas	95
Figura 4.16	Condições de fronteira para modelo 2 D: Caso de Estudo_2	95
Figura 4.17	Partição de 1/4 do modelo tomada para o estudo.	96
Figura 4.18	Modelo 3D: Caso de Estudo_2	96
Figura 4.19	(a) Malha dos elementos finitos do modelo; (b) Detalhe de malha na região de bobinas	97
Figura 4.20	Topologia do protótipo experimental implementado	98
Figura 4.21	Microcontrolador ESP32	99
Figura 4.22	(a) Sintetizador digital direto AD9850; (b) Acopladores óticos; (c) Conversor de potência ZH-30A DC5-12V	101
Figura 4.23	Ponte retificadora	101
Figura 4.24	Adaptador/divisor de tensão: (a) esquema; (b) módulo	102
Figura 4.25	Configuração das bobinas Tx e Rx e das placas de ferrite	102
Figura 4.26	Lâmpada incandescente usada como carga	103
Figura 4.27	Protótipo experimental implementado: lado Tx	104
Figura 4.28	Protótipo experimental implementado: lado Rx	104
Figura 4.29	Protótipo experimental implementado do lado Tx e Rx	105
<hr/>		
Figura 5.1	Campo elétrico [V/m] produzido pelo sistema de TESC	115



Figura 5.2	Campo elétrico [V/m] para distâncias entre as bobinas: (a) $\Delta = 40$ mm; (b) $\Delta = 80$ mm	116
Figura 5.3	Densidade de fluxo magnético [T] para distâncias entre bobinas: (a) $\Delta = 40$ mm; (b) $\Delta = 80$ mm; (c) $\Delta = 40$ mm – sem núcleo ferromagnético	117
Figura 5.4	Distribuição do fluxo magnético [T] com e sem núcleo ferromagnético	117
Figura 5.5	Distribuição de linhas do campo elétrico (a) e do campo magnético (b)	118
Figura 5.6	Campo elétrico [V/m] para distâncias entre bobinas: (a) $\Delta = 40$ mm; (b) $\Delta = 80$ mm	119
Figura 5.7	Campo elétrico [V/m]: (a) com blindagem de alumínio; (b) sem blindagem	120
Figura 5.8	Densidade de fluxo magnético [T] para distâncias entre bobinas: (a) $\Delta = 40$ mm; (b) $\Delta = 80$ mm	121
Figura 5.9	Campo elétrico [V/m] produzido pelo sistema de TESC: (a) vista lateral; (b) vista de secção transversal	122
Figura 5.10	Densidade do fluxo magnético [T] produzido pelo sistema de TESC: (a) vista lateral; (b) vista de secção transversal	122
Figura 5.11	Medidores do campo elétrico: (a) Narda SRM 3000; (b) PMM 8053A	124
Figura 5.12	Magnitudes das harmónicas para $P_{out} = 800$ W	126
Figura 5.13	Magnitudes do campo elétrico às diferentes distâncias de medição e $P_{out} = 800$ W	127
Figura 5.14	Emissões do campo elétrico às diferentes distâncias de medição	127
Figura 5.15	Campo elétrico no ambiente do Laboratório com o protótipo desligado	129
Figura 5.16	Emissões do campo elétrico em função de potência	129
Figura 5.17	Protótipo do sistema de TESC na gaiola de Faraday	130
Figura 5.18	Campo elétrico na gaiola de Faraday com o protótipo desligado	131

Figura 5.19	Harmónicas produzidas pelo sistema de TESC	131
Figura 5.20	Magnitudes das harmónicas produzidas pelo sistema de TESC	132
Figura 5.21	Magnitudes das harmónicas ímpares produzidas pelo protótipo de TESC	133
Figura 5.22	Configuração do ensaio para medição do <i>PER</i>	134
Figura 5.23	O ficheiro de captura de pacotes por <i>Wireshark</i>	135
Figura 5.24	<i>Setup</i> dos ensaios experimentais	136
Figura 5.25	O desalinhamento axial entre as bobinas Tx e Rx	136
Figura 5.26	Frequência de ressonância em função de distância entre Tx e Rx	137
Figura 5.27	Frequência de ressonância em função de desalinhamento entre Tx e Rx	138
Figura 5.28	Rendimento do protótipo em função de frequência de operação	138

# Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Desenvolvimentos históricos referidos à TESC	5
Tabela 1.2	Comparação entre os métodos de TESC	11
<hr/>		
Tabela 3.1	Classificação das frequências	55
Tabela 3.2	Efeitos biológicos e limites de exposição em função da frequência	68
Tabela 3.3	Níveis de referência para a exposição do público em geral [ICNIRP98]	71
Tabela 3.4	Níveis de referência para a exposição do público em geral [ICNIRP10]	72
Tabela 3.5	Comparação entre os protocolos de TDSF	77
<hr/>		
Tabela 4.1	Parâmetros do sistema de TESC – Caso de Estudo_1	89
Tabela 4.2	Parâmetros do sistema de TESC – Caso de Estudo_2	94
Tabela 4.3	Parâmetros dos circuitos Tx e Rx do protótipo experimental	103
<hr/>		
Tabela 5.1	Caraterísticas do protótipo – Caso de Estudo_1	125
Tabela 5.2	Comparação entre os valores do campo elétrico simulado e medido	139
Tabela 5.3	Valores do campo elétrico medido	141

# Lista de Siglas

AC	<i>Alternating current</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AFA	<i>AirFuel Alliance</i>
ANACOM	Autoridade Nacional de Comunicações
A4WP	<i>Alliance for Wireless Power</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
CISPR	<i>International Special Committee on Radio Interference</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EM	Eletromagnético
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
GEE	Gases com Efeito de Estufa

HF	<i>High Frequency</i>
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical radio bands</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
MC	Microcontrolador
SS	Série-Série
PC	<i>Personal Computer</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PMA	<i>Power Matters Alliance</i>
Rx	Recetor
SA	<i>Specific Absorbtion</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAR	<i>Specific Absorption Rate</i>
TESC	Transferência de Energia sem Contacto
TDSF	Transferência de Dados sem Fios
Tx	Transmissor
UE	União Europeia
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
VE	Veículo Elétrico
WPC	<i>Wireless Power Consortium</i>

WPT

*Wireless Power Transfer*

# Lista de Símbolos

<b>A</b>	Potencial vetor magnético [Wb/m]
<b>B</b>	Campo de indução magnética [T]
<i>B</i>	Densidade de fluxo magnético [T]
<i>C<sub>1</sub></i>	Capacitância do lado transmissor [F]
<i>C<sub>2</sub></i>	Capacitância do lado recetor [F]
<i>cosφ</i>	Fator de potência
<b>D</b>	Vetor densidade de fluxo eléctrico [C/m <sup>2</sup> ]
<i>D</i>	Ciclo de trabalho ( <i>duty cycle</i> )
<b>E</b>	Vetor campo eléctrico [V/m]
<i>E</i>	Intensidade do campo eléctrico [V/m]
<i>f</i>	Frequência [Hz]
<i>f<sub>s</sub></i>	Frequência de comutação [Hz]
<b>H</b>	Vetor campo magnético [A/m]
<i>H</i>	Intensidade do campo magnético [A/m]
<i>I<sub>1</sub></i>	Corrente do lado transmissor [A]
<i>I<sub>2</sub></i>	Corrente do lado recetor [A]
<b>J</b>	Vetor densidade de corrente eléctrica [A/m <sup>2</sup> ]
<i>J</i>	Densidade de corrente no corpo humano [A/m <sup>2</sup> ]

$k$	Coeficiente de acoplamento magnético
$L_1$	Indutância de bobina transmissora [H]
$L_2$	Indutância de bobina recetora [H]
$M_{12}$	Indutância mútua de bobinas [H]
$n$	Número da harmónica
$P_{in}$	Potência do lado de transmissor [W]
$P_{out}$	Potência aos terminais da carga [W]
$Q$	Fator de qualidade
$R_1$	Resistência de bobina transmissora [ $\Omega$ ]
$R_2$	Resistência de bobina recetora [ $\Omega$ ]
$R_1'$	Resistência total do circuito transmissor [ $\Omega$ ]
$R_2'$	Resistência total do circuito recetor [ $\Omega$ ]
$R_c$	Resistência de carga [ $\Omega$ ]
$\mathbf{S}$	Vetor de Poynting [W/kg]
$T_{sw}$	Duração total do ciclo [s]
$T_{pulse}$	Duração do impulso [s]
$Z_0$	Impedância da onda no vácuo [ $\Omega$ ]
$V_{dc}$	Tensão na entrada do inversor [V]
$t$	Tempo [s]
$Z_1$	Impedância de bobina transmissora [ $\Omega$ ]
$Z_2$	Impedância de bobina recetora [ $\Omega$ ]
$\Delta$	Distância entre as bobinas transmissora e recetora [mm]



$\varepsilon_0$	Permitividade elétrica do vácuo [F/m]
$\varepsilon_r$	Permitividade relativa do meio
$\eta$	Rendimento da transferência de energia
$\lambda$	Comprimento de onda [m]
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo [H/m]
$\mu_r$	Permeabilidade relativa do meio
$\omega_0$	Frequência de ressonância angular [rad/s]
$\rho$	Massa volumétrica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Condutividade elétrica do meio [S/m]

---

# CAPÍTULO

# 1

---

## Introdução

*Neste capítulo são apresentados os aspetos gerais dos sistemas de transferência de energia sem contacto. É apresentado o enquadramento do tema deste trabalho, a motivação, os objetivos a atingir e a linha de investigação seguida. Ainda, é descrita a forma como o texto está organizado e a notação utilizada no trabalho.*

## 1.1 Enquadramento e Motivação

A energia constitui o elemento vital para o desenvolvimento da sociedade com repercussões significativas nos processos de crescimento dos sistemas económicos, sendo um fator relevante no consumo e na produção de bens e serviços das diversas atividades humanas [Teixeira12].

Os desafios e preocupações no acesso à energia são transversais a todos os objetivos e desenvolvimentos definidos pelas Nações Unidas. Nomeadamente, as preocupações com a energia estão relacionadas com a segurança no acesso à energia, à competitividade da economia e ao desenvolvimento sustentável. Partindo de uma abordagem de desenvolvimento sustentável que integra as preocupações sobre a energia requeridas pela União Europeia (UE), nomeadamente, por Portugal, estão norteadas pelos esforços para o cumprimento do Protocolo de Quioto e das decisões sucedâneas. Assim, o desenvolvimento assenta na combinação de mudanças mentais e sociais de uma população que a tornam apta para fazer crescer o seu nível de vida. Um desenvolvimento sustentável satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades e particularmente na forma de energia elétrica, visto que esta forma de utilização da energia tem significativas vantagens quando comparadas com as restantes formas de energia.

A utilização racional da energia está associada à de eficiência energética que por sua vez pode ser definida como a possibilidade de melhorar o consumo de energia, nomeadamente, nos setores da energia elétrica e dos transportes, respetivamente. A utilização da energia de forma racional para Portugal tem particular importância, considerando a dependência externa em termos de energia primária, superior à média da UE e dos países comparáveis [Melício10]. Acresce ainda que Portugal é confrontado com a necessidade de desenvolver formas alternativas de produção de energia elétrica que permitam proceder a uma política de mitigar as emissões

antropogénicas de gases de efeito de estufa (GEE) para a atmosfera [Melício10, APA14].

O sector dos transportes continua a ser um dos sectores de atividade com maior consumo de energia, nomeadamente, o dos transportes rodoviários. Os transportes rodoviários são os principais emissores de GEE, uma vez que representam cerca 60% de CO<sub>2</sub>, 50% de C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> e cerca de 40% de NO<sub>x</sub> [APA15]. Assim, é urgente uma mudança mental e social relativamente ao consumo de energia no sentido de mitigar a dependência dos combustíveis fósseis e garantir a redução das emissões de GEE para atmosfera [APA14].

Uma forma de mitigar a dependência dos combustíveis fósseis e das emissões de GEE para atmosfera no setor dos transportes, é a promoção de mais investigação para o desenvolvimento dos veículos elétricos (VE) e híbridos. Os VEs / híbridos apresentam vantagens face aos veículos de combustão interna, nomeadamente, a eficiência energética, a mitigação das emissões de GEE para a atmosfera, os custos de manutenção significativamente mais baixos. Assim, os VE / híbridos podem ser considerados como uma medida da mitigação das emissões de GEE e da dependência externa de energia primária. No entanto, ainda há limitações significativas no uso dos VEs, nomeadamente, no que se refere às baterias. Uma das principais desvantagens é o elevado preço e a autonomia das baterias [Kim14a, Li15b]. Uma forma de resolver a desvantagem da autonomia das baterias, é o estudo de novos sistemas de carregamento, nomeadamente, utilizando os sistemas de transferência de energia elétrica sem contacto (TESC) [Zhu08, Chawla12, Jang12, Li15b]. O carregamento de baterias utilizando o sistema de TESC pode ser realizado quando os veículos estão estacionados ou em movimento.

A maioria dos estudos sobre o sistema de TESC foca no rendimento da transferência de energia [Imura09a, Sample09, Beh13, Yamakawa14, Lyu15], ou nas aplicações biomédicas [Hmida07, Jolani13, Ke14, Campi16], havendo uma lacuna no estudo das emissões eletromagnéticas (EM) irradiadas pelo sistema de

TESC, sendo esta uma das contribuições deste trabalho.

Os efeitos das emissões EM irradiadas pelo sistema de TESC sobre a saúde de seres vivos ou sobre outros dispositivos elétricos/eletrônicos, nomeadamente o canal de transmissão de dados entre o transmissor (Tx) e o recetor (Rx), não foram ainda suficientemente estudados [Obayashi14, Gao15], sendo esta outra contribuição deste trabalho. Na literatura disponível existem poucos estudos sobre a exposição de seres vivos a campos EM produzidos pelos sistemas de TESC [Laakso15].

Assim, este trabalho trata sobre o tema das emissões EM irradiadas pelo sistema de TESC durante o carregamento da bateria do VE e o impacto das mesmas sobre saúde dos seres vivos nas imediações próximas do VE durante o carregamento da bateria e o canal de transmissão de dados. Assim, este trabalho representa uma contribuição para o desenvolvimento sustentável no âmbito de TESC. Este trabalho também trata sobre a implementação de protótipo experimental de sistema de TESC simultaneamente com transmissão de dados sem fios e desenvolvimento de aplicação computacional que permite sintonizar o modo de funcionamento do sistema para o regime de ressonância.

## **1.2 Transferência de Energia sem Contacto**

A transferência de energia sem contacto, i.e., TESC, introduzido no século XIX por Nikola Tesla voltou a surgir novamente nas duas últimas décadas [Boys02, Kurs07, Zhu08]. Os desenvolvimentos históricos mais significativos referidos à TESC são apresentados na Tabela 1.1.

A classificação da TESC utilizada neste trabalho está relacionada com a propagação dos campos EM, estando dividida nos seguintes métodos: o campo próximo e o campo distante [Balanis05, Bienkowski12].

Tabela 1.1 – Desenvolvimentos históricos referidos à TESC

1820	M.A. Ampere descobre que a corrente elétrica produz um campo magnético
1831	M. Faraday e J. Henry descobrem a indução eletromagnética de forma independente
1864	J.C. Maxwell cria um modelo matemático de radiação eletromagnética
1888	H. Hertz prova experimentalmente o modelo de J.C. Maxwell (primeiro transmissor de rádio)
1893	N. Tesla demonstra a iluminação sem contacto na Exposição Mundial em Chicago
1926	H. Yagi cria a estrutura da antena transmissora de energia UHF
1944	G. Babat (URSS) implementa a TESC por indução eletromagnética a um veículo industrial
1964	W. Brown demonstra um modelo de helicóptero movido por energia de micro-ondas a partir do transmissor
1968	P. Glaser propôs o conceito do " <i>Satellite Power Systems</i> ", SPS, que despertou o interesse para a transferência de energia por micro-ondas
1971	Prof. D. Otto desenvolve um pequeno carrinho alimentado por indução eletromagnética na Universidade de Auckland, Nova Zelândia
1996-1998	Desenvolvimento e implementação do primeiro protótipo de transporte público por acoplamento indutivo por J. Boys na Nova Zelândia
2007	Equipa de MIT transmitiu 60W a uma distância de 2 metros com uma eficiência de 40% por acoplamento indutivo ressonante
2010	Bombardier Transportation instalou um projeto-piloto do elétrico denominado PRIMOVE e alimentado por um sistema de TESC na cidade alemã de Augsburg

Os métodos do campo próximo envolvem a aplicação do campo magnético e técnicas indutivas para a TESC através de distâncias relativamente curtas (normalmente muito inferior a 1 m, exceccionalmente atingindo até poucos metros). Neste trabalho são estudados os métodos do campo distante que envolvem energia EM irradiada, nomeadamente, micro-ondas e laser, e permitem a transferência de

energia de longo alcance, i.e., para distâncias maiores do que o comprimento de onda EM [Kurs07, Qiu14, Vilathgamuwa15].

Uma classificação dos métodos de TESC é apresentada na Figura 1.1.

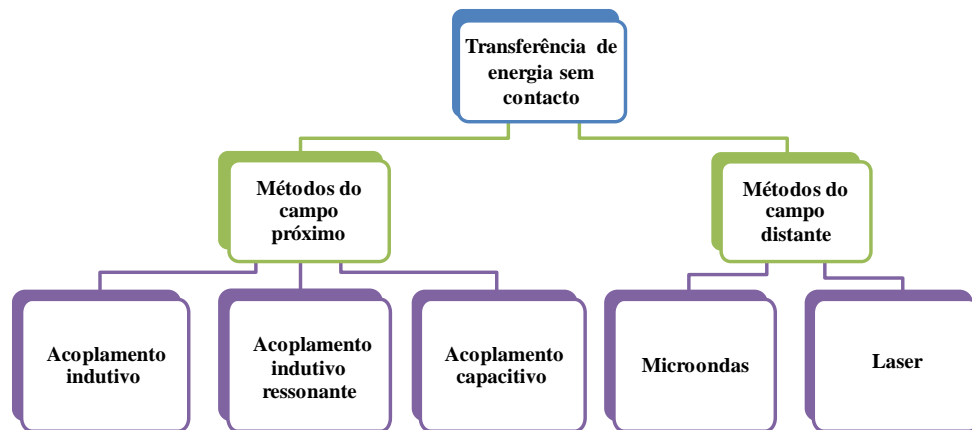


Figura 1.1 – Métodos de transferência de energia sem contacto.

### *Métodos do campo próximo*

#### *Acoplamento indutivo*

A operação de um transformador é o exemplo mais simples da técnica de indução magnética, onde a energia é transferida a partir de uma bobina Tx para uma bobina Rx sem contacto elétrico. Os carregadores de baterias indutivos para telefones móveis, escovas elétricas de higiene dental ou placas de indução são exemplos da utilização desta técnica. A principal desvantagem do método do acoplamento indutivo é a curta distância da transferência (normalmente até alguns centímetros).

O método de transferência de energia por acoplamento indutivo é atualmente utilizado como uma técnica convencional colocada à disposição do mercado por grandes empresas, nomeadamente, Sony, Fujitsu, Energizer, Conductix-Wampfler.

O sistema de transporte de alta-frequência [Ahn10] é um outro exemplo da técnica de TESC por acoplamento indutivo. Geralmente um enrolamento primário do

transformador é colocado ao longo do percurso e o enrolamento secundário é colocado no VE. A energia é transferida do primário para o secundário utilizando a indução EM.

Em 1943 na USSR foi construído um VE de carga alimentado por um sistema de TESC [Babat47]. O VE foi denominado de "automóvel de alta frequência". O motor do automóvel de alta frequência tinha uma potência nominal de 2 kW, circulando numa estrada em que o primário estava enterrado por debaixo do asfalto. A frequência do primário era 50 kHz. Depois da retificação a energia obtida no secundário (VE) foi utilizada para alimentar a bateria [Babat47].

Em [Boys02] é descrito um sistema de TESC desenvolvido em 1996 na Nova Zelândia. Baseado neste sistema, em 1998 foi implementado o primeiro protótipo de transporte público por indução magnética, sendo a potência de cerca de 30 kW com carregamento sem contacto nos terminais ao longo do percurso.

Em 2009 a Bombardier Transportation apresentou o primeiro elétrico sem catenárias e alimentado por um sistema de TESC, tendo sido denominado de PRIMOVE. O elétrico é carregado por indução magnética, estando as bobinas indutoras enterradas e colocados em pontos específicos, i.e., numa paragem, numa interseção de estradas ou num parque de estacionamento. A transferência de energia só é efetuada quando o veículo está localizado sobre esse ponto. A técnica de acoplamento indutivo já está a ser utilizada em fábricas de produção automóvel e grandes armazéns para alimentar sistemas robóticos, transportadores e VEs [Boys02, Ahn10].

#### *Acoplamento capacitivo*

A ideia de acoplamento capacitivo foi patenteada em 1998 por A. Rozin. No acoplamento capacitivo a energia é transmitida entre as placas metálicas formando assim um ou mais condensadores pela oscilação de um campo elétrico de alta frequência. A bateria ou outro equipamento eletrónico é alimentado no lado do Rx



pela corrente capacitiva transportada a alta frequência, i.e., retificada. A eficácia do acoplamento capacitivo está limitada pela distância entre as placas do Tx e do Rx e os valores da potência associada à energia transmitida é baixa. Esta técnica é aplicável em sistemas de alimentação de sensores, equipamentos de *Smart card* ou em pequenos robôs [Kline11].

#### *Acoplamento indutivo ressonante*

O acoplamento indutivo não é eficiente uma vez que o campo EM é dispersado em todas as direções pelo ar, assim, uma quantidade de energia é perdida o que reduz a distância de operação até alguns cm. No acoplamento indutivo ressonante recorrendo ao regime de ressonância entre o circuito Tx e o circuito Rx é possível transferir energia elétrica para distâncias na ordem dos metros, sendo as perdas da transferência menores em comparação com as perdas do acoplamento indutivo [Kurs07, Zhu08].

O acoplamento indutivo ressonante ocorre quando dois circuitos sintonizados para a mesma frequência de ressonância trocam energia entre si através das oscilações dos seus campos EM de forma eficiente e praticamente não reagem com os objetos que trabalhem a outras frequências de ressonância [Kurs07, Karalis08].

Investigadores do *Massachusetts Institute of Technology* mostraram que um acoplamento indutivo ressonante pode ser usado para transferir a energia sem contacto às distâncias maiores, i.e., até 2 m. O sistema de transferência de energia por acoplamento indutivo ressonante com frequência de ressonância de 9.9 MHz [Kurs07] é apresentado na Figura 1.2.

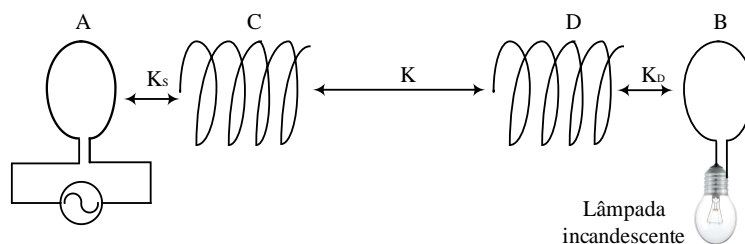


Figura 1.2 – Configuração simplificada de TESC por acoplamento indutivo ressonante.

Transferência de energia por acoplamento indutivo ressonante consiste na utilização de quatro bobinas de cobre sem contacto elétrico entre si. Os enrolamentos A e B são as bobinas que estão ligadas à fonte de energia e à carga, i.e., a lâmpada incandescente de 60 W, respetivamente. Os enrolamentos C e D são circuitos ressonantes entre os quais a energia é transferida por acoplamento indutivo ressonante. Entre a bobina de alimentação e a bobina ressonante a energia é transferida por indução magnética à lâmpada [Kurs07].

A experiência demonstrou que, ao colocar vários objetos entre o Tx e o Rx, o campo magnético transfere a energia através de materiais isolantes e de obstáculos metálicos que o rendimento deste sistema de TESC pode atingir 50% ou até mais.

### ***Métodos do campo distante***

#### ***Micro-ondas***

O sistema da transferência de energia por micro-ondas consiste em três componentes essenciais: um conversor de energia de micro-ondas convencional, uma antena de transmissão e uma combinação de recetor e conversor, a chamada unidade *rectenna*. Esta técnica permite transmitir a energia a uma distância muito superior do que nos métodos do campo próximo.

Um dos pioneiros da transferência de energia por micro-ondas foi o W. Brown, que em 1964 demonstrou o modelo de um helicóptero equipado com *rectenna*. O feixe de micro-ondas enviado a partir do solo foi recebido pelo *rectenna* e convertido em energia elétrica, alimentando a bateria do helicóptero [Brown84].

Uma possível aplicação de TESC por micro-ondas é a ideia de utilizar estações de energia solar no espaço [Landis97]. Em 1968 P. Glaser sugeriu a colocação de grandes painéis solares em órbita geoestacionária para recolher e converter a luz solar em micro-ondas, cuja energia seria transmitida à terra e convertida em energia elétrica convencional [Ongaro06].

Nos últimos anos, as atividades industriais nesta área já estão em recuperação novamente. Em 2009 a corporação Solaren assinou um contrato com a Companhia de Energia da Califórnia para fornecer 200 MW de energia elétrica produzida no espaço desde o início de 2016, mas agora é esperado que o projeto esteja funcional até o final desta década.

A transferência de energia por micro-ondas em comparação com a transferência por laser é mais desenvolvida e mais eficiente [Xie13]. Os principais inconvenientes para este método de TESC são o elevado custo, o tamanho das antenas na ordem de quilômetros e questões de segurança na zona de transmissão/receção.

### *Laser*

A transferência de energia por laser pode ser realizada através da conversão de energia elétrica em emissão laser. O feixe de laser pode ser focado num painel solar que o transforma em energia elétrica com um rendimento de 40-50%. O laser é ideal para a transferência de energia a longas distâncias, pois apresenta um feixe coerente quase não divergente, com alta densidade de energia, permitindo assim um menor diâmetro da antena em comparação com a transferência de energia por micro-ondas.

As desvantagens reduzem os benefícios do laser: a imperfeição dos sistemas acessórios existentes conduz a uma perda da maior parte da energia durante a transformação do feixe de laser em energia elétrica. Antes de incrementar o rendimento do método devem ser desenvolvidas células solares mais eficientes. Outro inconveniente significativo está relacionado com a segurança: o perigo de qualquer objeto ser atingido na área de laser [Landis97].

A energia do laser já é utilizada com sucesso em modelos e protótipos desenvolvidos por empresas especializadas, tal como por exemplo, a LaserMotive, tendo desenvolvido um protótipo de elevador espacial para levantar uma carga de

50 kg, alimentado por um feixe de laser com uma potência da ordem de 1 kW.

### *Comparação entre os métodos*

A comparação entre os métodos existentes é apresentada na Tabela 2 com base no conhecimento existente.

Tabela 1.2 – Comparação entre os métodos de TESC

Propriedades	Métodos				
	Acoplamento indutivo	Acoplamento indutivo ressonante	Acoplamento capacitivo	Micro-ondas	Laser
Potência	de W até centenas de KW	de W até dezenas de kW	até 1 W	até dezenas de kW	esperado MW
Distância de operação	alguns cm	alguns m	alguns mm	dezenas de km	até dezenas de km
Frequência de operação	de alguns kHz até dezenas de kHz	dezenas de kHz-até aos 100 MHz	centenas de kHz até aos MHz	até aos 300 GHz	superior a 1 THz
Rendimento	aceitável	alto	aceitável	alto	esperado alto
Impacto Biológico	médio	alto	baixo	alto	alto

Os métodos direcionais, i.e., por feixe, são mais adequados para a transferência de grandes valores de energia. Os sistemas baseados a laser são considerados por enquanto menos maduros do que os sistemas baseados a micro-ondas [Xie13].

Os métodos do campo distante, nomeadamente, de transferência da energia por micro-ondas e laser, com antenas direcionais poderiam ser utilizados em longas distâncias no espaço, na indústria militar ou aplicações industriais [Qiu14]. No entanto, para aplicações de consumo, como telemóveis, outros dispositivos eletrónicos portáteis ou VEs estes métodos não são adequados por causa do rendimento e questões de segurança [Brown84, Zhu08].

Entre os métodos do campo próximo, o acoplamento indutivo é considerado uma técnica madura e funcional, mas limitada pela distância de operação, baixo

rendimento e pela necessidade de um alinhamento preciso na direção do carregamento de baterias [Imura09b, Chawla12, Beh13]. As aplicações baseadas em acoplamento capacitivo são limitadas pelo baixo valor da energia transmitida e pela curta distância, mas é aplicável no equipamento de cartões inteligentes ou em pequenos robôs. O acoplamento indutivo ressonante hoje em dia é utilizado para o carregamento de baterias e aplicações na indústria. Esta técnica tem um alto rendimento para curtas e médias distâncias e tem uma interação limitada com objetos não-ressonantes [Zhu08, Cannon09, Li15b].

### **1.2.1 Questões e hipóteses de investigação**

O método de acoplamento indutivo ressonante é reconhecido como o mais adequado para alcançar a transferência de energia eficiente para o carregamento da bateria de VE sem contacto [Kurs07, Karalis08, Sample09, Imura09a, Imura09b, Li15b, Romba16]. O método de acoplamento indutivo ressonante é mais vantajoso uma vez que não necessita de um estacionamento ou posicionamento do veículo de forma precisa como no caso do acoplamento indutivo. Quando se trata de carregamentos simultâneos de múltiplas cargas, a TESC por acoplamento indutivo ressonante é a solução mais adequada [Beh13].

Para que um equipamento industrial, de qualquer natureza, funcione de forma eficiente e segura é necessário implementar um sistema de supervisão apropriado. O objetivo principal de supervisão nos sistemas de TESC é a coordenação do processo de transferência de energia entre o Tx e o Rx. Para a transferência eficaz e segura da energia, o Tx precisa de reconhecer o Rx e verificar se o acoplamento é adequado [Beh13]. Um passo importante é combinar a transferência de energia com transmissão de dados. A transmissão de dados, nomeadamente, a identificação do veículo, a frequência, os valores de potência, os dados do usuário, são alguns exemplos da informação necessária. Essa troca de dados deve ser realizada *online* com segurança e com a elevada velocidade, sendo necessário definir um protocolo de comunicação robusto entre o Tx e o Rx.

A comunicação entre o Tx e o Rx é importante, especialmente quando os campos EM de alta intensidade possam provocar influência indesejável sobre o canal de dados. Neste sentido é fundamental garantir que o sistema de TESC não influencie nem perturbe a comunicação entre os dois dispositivos com as emissões EM irradiadas e correntes induzidas. Os fortes campos EM produzidos pelo sistema de TESC podem não só influenciar negativamente outros equipamentos elétricos e eletrônicos adjacentes, mas também interagir com os seres vivos nas imediações próximas do VE durante o carregamento da bateria com efeitos potencialmente nocivos. A Organização Mundial de Saúde (*World Health Organization*, WHO) recomenda que os dispositivos elétricos/eletrônicos devam respeitar os limites de segurança de exposição humana às radiações EM. Os limites de segurança são estabelecidos principalmente pela Comissão Internacional para a Proteção contra as Radiações Não-Ionizantes (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, ICNIRP) [ICNIRP98, ICNIRP10] e pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*, IEEE) [IEEE05].

A transferência de energia pelo método de acoplamento indutivo ressonante necessita de sintonizar a frequência do funcionamento para o regime de ressonância do sistema de TESC. Assim, é importante desenvolver e implementar um protótipo do sistema de TESC que tem a capacidade de sintonizar a frequência de operação para o regime de ressonância recorrendo à troca de dados por meio de canal de comunicação entre o Tx e o Rx.

Tendo em consideração os aspetos descritos, a principal questão de investigação escolhida para este trabalho é a seguinte:

**Q1.** Como pode ser avaliado o impacto do campo EM de elevada intensidade produzido pelo sistema de TESC sobre os seres vivos e o canal de comunicação entre o Tx e o Rx?

A hipótese proposta para resolver esta questão de investigação é a seguinte:

**H1.** Para responder a Q1 é importante avaliar os valores dos campos EM produzidos pelos sistemas de TESC e estabelecer uma comparação com os limites de segurança definidos pelas organizações internacionais reconhecidas. Para explorar a distribuição do campo EM produzido pelo sistema de TESC e estimar os valores do mesmo é importante recorrer a simulações computacionais para comparar com os resultados experimentais.

As questões de investigação assessorias propostas são as seguintes:

**Q1a.** O campo EM produzido pelo sistema de TESC está em conformidade com as normas de segurança estabelecidas e seguro?

**Q1b.** Os campos EM provenientes do sistema de TESC podem influenciar ou perturbar o canal de comunicação?

A fim de encontrar respostas para as questões de pesquisa Q1a e Q1b devem ser levados em consideração os seguintes passos:

- Medição da intensidade do campo EM produzido pelo sistema de TESC e a comparação dos resultados com os níveis de segurança estabelecidos pelas organizações internacionais;
- Realização de testes do desempenho das comunicações entre o Tx e o Rx no sistema de TESC para avaliar o impacto das emissões do campo EM sobre o canal de transferência de dados sem fios (TDSF)

A segunda questão de investigação escolhida para este trabalho é a seguinte:

**Q2.** Como pode ser sintonizado o modo de funcionamento do sistema de TESC para o regime de ressonância?

A hipótese proposta para resolver esta questão de investigação é a seguinte:

**H2.** Para responder a Q2 é necessário implementar o canal de comunicação entre o Tx e o Rx e desenvolver uma aplicação computacional que permita coordenar o processo de TESC e sintonizar o modo de funcionamento do sistema para o regime

de ressonância.

### **1.2.2 Abordagem**

Uma vez que a maioria de estudos são dedicados à simulação e medição do campo magnético produzido pelo sistema de TESC, havendo uma lacuna relativamente ao estudo do campo elétrico, neste trabalho foi decidido fazer a investigação sobre a componente elétrica do campo EM produzido pelo sistema de TESC.

A fim de dar respostas às questões de investigação propostas, a seguir são apresentadas e definidas as principais direções de investigação.

#### ***Transferência simultânea de energia e de dados sem contacto***

Na transferência simultânea de energia e de dados sem contacto, para incrementar o rendimento do processo de TESC, é necessário que haja troca de dados, de maneira rápida e segura, entre o Tx e o Rx. Assim, para incrementar o rendimento do sistema de TESC é proposto um sistema não só para a transferência de energia, mas também para a transmissão de dados sem fios (TDSF) entre o Tx e o Rx. A possibilidade da transmissão de dados num sistema de TESC oferece a interação entre o Tx e o Rx, nomeadamente, facilita a tarefa da deteção e identificação dos dispositivos e coordena o processo de carregamento da bateria. Desta forma, é possível coordenar e corrigir o processo de carregamento da bateria do VE e monitorizar o processo de TESC.

No sistema de TESC proposto é implementada uma comunicação entre o Tx e o Rx utilizando microcontroladores (MCs). O uso dos MCs possibilita monitorizar o funcionamento do sistema de TESC permitindo a transferência de dados em tempo real e sintonizando o modo de funcionamento do sistema para o regime de ressonância. O funcionamento do sistema de TESC no regime de ressonância incrementa o rendimento do sistema devido à capacidade de comunicação entre o Tx e o Rx.



### ***Transferência de dados sem fios***

As comunicações sem fios têm demonstrado um potencial nas aplicações industriais e comerciais, mais precisamente na aquisição de dados que podem ser recolhidos e transferidos para coordenação e monitorização de processos tecnológicos.

Tendo em conta que a comunicação entre o Tx e o Rx é indispensável para a coordenação da transferência de energia, é necessário definir um protocolo de comunicação entre os MCs. No entanto, os protocolos de comunicação sem fios em sistemas de TESC praticamente não foram discutidos em estudos anteriores [Kim13b]. A fim de definir a comunicação entre o Tx e o Rx adequada é necessário analisar e comparar os protocolos de comunicação sem fios disponíveis, as quais podem ser aplicadas aos sistemas de TESC para carregamento de baterias e troca de informação entre o Tx e o Rx.

### ***Emissões eletromagnéticas***

Em resultado da intensiva utilização da energia elétrica no último terço do século XX surgiu um novo e significativo fator de poluição - o eletromagnético. O desenvolvimento de modernos sistemas de informação e transferência da energia, controlo remoto e monitorização, bem como alguns tipos de transporte, contribuiu para o aparecimento de emissões EM irradiadas. Os sistemas atuais são fontes de poluição EM omnipresente de campos eletromagnéticos produzidos e radiação EM resultante [Redlarski15].

### ***Impacto dos campos EM sobre saúde humana***

O campo EM irradiado pelas bobinas do Tx e do Rx são a propriedade fundamental do sistema de TESC baseado no acoplamento indutivo ressonante [Kong15]. A energia EM transferida pelo sistema de TESC e irradiada para o ambiente circundante é absorvida pelos seres vivos, nomeadamente, os seres humanos nas

imediações próximas do VE durante o carregamento da bateria. Contrariamente aos sistemas de comunicações sem fios, o valor da potência EM irradiada pelo sistema de TESC é bastante elevada [Lin13].

Nos últimos anos, o número de trabalhos de investigação científica dedicados ao impacto dos campos EM nos organismos vivos incrementou significativamente [Redlarski15]. Os estudos mostram que os campos EM são prejudiciais e podem ter efeitos adversos sobre o corpo humano [Ozdemir11, Mahajan12, Kosatsky13, IARC13, Rifai14, Redlarski15, SCENIHR15]. Embora na literatura alguns trabalhos afirmem que a TESC é segura para os seres vivos [Kurs07], é impossível prever o impacto de tal exposição sobre a saúde humana ao longo do tempo. As questões de compatibilidade eletromagnética (CEM) dos sistemas de TESC estão relacionadas com a investigação e análise de processos EM no corpo humano exposto à energia EM proveniente dos mesmos.

O campo EM de baixa frequência estudado neste trabalho ao incidir sobre o corpo pode entrar em sincronização com as frequências básicas das estruturas biológicas do mesmo e, assim, desordenar ou afetar as funções do organismo. As consequências podem ser distúrbios hormonais e do ritmo cardíaco, processos degenerativos no sistema nervoso central e outras manifestações [Stozharov07, IARC13, SCENIHR15, Staebler17]. Assim, a medição da intensidade do campo EM produzido pelo sistema de TESC e a comparação dos resultados com os níveis de segurança estabelecidos pelas organizações internacionais são importantes para avaliação do impacto do campo EM sobre saúde.

#### *Impacto dos campos EM sobre canal de transmissão de dados*

A transmissão de dados entre o Tx e o Rx através de um canal de comunicação está destinado à coordenação do processo de transferência de energia no sistema de TESC. No entanto o campo EM de alta intensidade da ordem de alguns kW até às dezenas de kW de um sistema de TESC pode provocar influência indesejável

sobre o canal de comunicação que opera com as potências na ordem das dezenas de mW. Neste caso os dados transferidos podem ser influenciados transmitindo informações errôneas.

Assim, o desempenho do canal de comunicação entre o Tx e o Rx exposto ao campo EM produzido pelo sistema de TESC deve ser avaliado adequadamente.

### **1.3 Contribuições Originais**

A motivação para abordar o tema de estudo da componente elétrica das emissões EM produzidas pelo sistema de TESC advém da necessidade de dar resposta aos problemas relacionados com o impacto dos campos EM na saúde de seres vivos, em particular, na saúde humana, e no canal de transmissão de dados. Este trabalho trata um tema de investigação de interesse e de importância, visando a avaliação dos valores das emissões do campo elétrico produzido pelo sistema de TESC. São também comparados os valores das emissões do campo elétrico produzido pelo sistema de TESC com os limites de segurança estabelecidos pelas organizações internacionais reconhecidas.

Também, no âmbito deste trabalho está incluída a implementação de um protótipo do sistema de TESC com o canal de comunicação entre o Tx e o Rx e desenvolvimento de uma aplicação computacional que permite a sintonização de frequência de operação do protótipo para o regime de ressonância.

Este trabalho está organizado nas tarefas seguintes:

- T1. estudo experimental e por simulação computacional das emissões EM produzidas pelo sistema de TESC;
- T2. comparação dos resultados experimentais com os resultados das simulações computacionais;

- T3. avaliação dos valores das emissões EM produzidos pelo sistema de TESC para dois casos de estudo e comparação com os limites de segurança estabelecidos pelas organizações internacionais reconhecidas;
- T4. o estudo sobre a seleção de protocolo de comunicação sem fios entre o Tx e o Rx a ser aplicado no protótipo de sistema de TESC;
- T5. o estudo do nível de influência das emissões EM sobre a transmissão de dados pelo canal de comunicação entre o Tx e o Rx;
- T6. implementação de um protótipo experimental do sistema de TESC para a transferência de energia simultaneamente com a transmissão de dados;
- T7. desenvolvimento de uma aplicação computacional que permite sintonizar a frequência do funcionamento do protótipo experimental para o regime de ressonância do sistema.

Assim, as contribuições originais deste trabalho foram as seguintes:

- C1. modelação do sistema de TESC permitindo uma simulação computacional da distribuição do campo EM produzido pelo sistema de TESC;
- C2. estudo experimental e por simulação computacional da distribuição da componente elétrica do campo EM produzido pelo sistema de TESC;
- C3. avaliação do nível de influência das emissões EM sobre a transmissão de dados pelo canal de comunicação entre o Tx e o Rx;
- C4. desenvolvimento do protótipo do sistema de TESC para a transferência de energia simultaneamente com a transmissão de dados;
- C5. implementação de um sistema de comunicação entre o Tx e o Rx do protótipo experimental em tempo real que permite troca de dados entre o Tx e o Rx;

- C6. desenvolvimento de uma aplicação computacional que permite sintonizar a frequência do funcionamento do protótipo experimental para o regime de ressonância do sistema.

## 1.4 Publicações

Quando se adota numa determinada área escolhida um tema de investigação original cujos trabalhos têm como objetivos principais não só contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico da área escolhida, mas também a obtenção de um determinado grau académico pós-graduado, como é o caso deste trabalho, é fundamental, à medida que as diferentes tarefas previamente planeadas vão sendo cumpridas, que os respetivos resultados sejam publicados periodicamente com o fim de os submeter à comunidade científica, assim como de incentivar à discussão e à troca de ideias, resultando usualmente no aperfeiçoamento daqueles resultados.

Em consequência, e de acordo com o fim de submeter à comunidade científica as contribuições deste trabalho, assim como de incentivar à discussão e à troca de ideias, é apresentada a lista dos trabalhos publicados.

### Publicações Científicas em Revistas

- E. N. Baikova, L. Romba, S. S. Valtchev, R. Melicio, V. Fernão Pires, A. Krusteva, G. Gigov, "Electromagnetic field generated by a wireless energy transfer system: comparison of simulation to measurement", Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 32, N. 5, pp. 554–571, November 2017; DOI: 10.1080/09205071.2017.1399832.
- E.N. Baikova, S.S. Valtchev, R. Melicio, A. Krusteva, V. Fernão Pires, "Study of the electromagnetic interference generated by wireless power transfer systems", International Review of Electrical Engineering, 2016, Vol. 11, N. 5, pp. 526–534, November 2016; DOI: 10.15866/iree.v11i5.9773.

- E.N. Baikova, S.S. Valtchev, R. Melício, V.M. Pires, "Electromagnetic interference from a wireless power transfer system: experimental results", *Renewable Energy and Power Quality Journal*, Vol. 1, N. 14, pp. 1020–1024, May 2016; DOI: 10.24084/repqj14.560.

### **Capítulos em Livro**

- E. Baikova, L. Romba, S. Valtchev, R. Melício, V. Fernão Pires, "Electromagnetic influence of WPT on human's health: modelling, simulation and measurement", in *Emerging Capabilities and Applications of Wireless Power Transfer*, IGI Global, Hershey, Pennsylvania, USA, pp. 141–161, 2019, DOI: 10.4018/978-1-5225-5870-5.ch006.
- L. Romba, E.N. Baikova, S.S. Valtchev, R. Melício, "Efficiency improvement in wireless power system", in *Emerging Capabilities and Applications of Wireless Power Transfer*, IGI Global, Hershey, Pennsylvania, USA, pp. 23–48, 2019; DOI: 10.4018/978-1-5225-5870-5.ch002.
- E.N. Baikova, L. Romba, R. Melício, S.S. Valtchev, "Simulation and experiment on electric field emissions generated by wireless energy transfer", in *Technological Innovation for Resilient Systems*, Eds. L.M. Camarinha-Matos et al., SPRINGER, DoCEIS 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 521. Springer, Cham, pp 243–251, 2018; DOI: 10.1007/978-3-319-78574-5\_23.
- L. Romba, E.N. Baikova, C. Borges, S.S. Valtchev, R. Melício "Wireless battery charger for EV with circular or planar coils: comparison", in *Technological Innovation for Resilient Systems*, Eds. L.M. Camarinha-Matos et al., SPRINGER, DoCEIS 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 521. Springer, Cham, pp 214–223, 2018; DOI: 10.1007/978-3-319-78574-5\_20.

- E.N. Baikova, S.S. Valtchev, R. Melício, V.M. Pires, "Electromagnetic interference impact of wireless power transfer system on data wireless channel", in Technological Innovation for CyberPhysical Systems, Eds. L.M. Camarinha-Matos et al., SPRINGER, Heidelberg, Germany, pp. 293–301, 2016; DOI: 10.1007/978-3-319-31165-4\_29.

### **Publicações Científicas em Conferências**

- E.N. Baikova, L.F. Romba, S.S. Valtchev, R. Melício, V. Fernão Pires, "Electromagnetic emissions from wireless power transfer system", Conference on Electronics, Telecommunications and Computers, pp. 1-2, Lisbon, Portugal, December 2016, SOURCE-WORK-ID: d4668e54-da47-4529-9d28-9f6b314052e6.
- L.F. Romba, E.N. Baikova, S.S. Valtchev, R. Melício, "Electric vehicle battery charger: wireless power transfer system controlled by magnetic core reactor", CETC2016 - Conference on Electronics, Telecommunications and Computers, pp. 1-2, Lisbon, Portugal, December 2016; SOURCE-WORK-ID: 949de8ce-ef33-46c4-a8b9-f64365a15137.
- E.N. Baikova, S.S. Valtchev, R. Melício, A. Krusteva, G. Gigov, "Study on electromagnetic emissions from wireless energy transfer", IEEE 17th International Conference on Power Electronics and Motion Control, (PEMC), Varna, Bulgaria, September 2016; DOI: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752045.
- E.N. Baikova, S.S. Valtchev, R. Melício, V. Fernão Pires, "Wireless power transfer impact on data channel", IEEE Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 582–587, Capri, Italy, June 2016; DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7526006.

## 1.5 Organização do Texto

Ao escrever este trabalho houve o propósito de conseguir uma linguagem fácil, agradável e harmoniosa, para que o tema seja entendido pelo leitor com precisão, ordem e propriedade. Este propósito determinou a organização do texto do trabalho, que para além deste capítulo está dividido nos capítulos:

Capítulo 2, Estado da Arte.

Capítulo 3, Impacto das Emissões Eletromagnéticas Irradiadas.

Capítulo 4, Modelação e Implementação do Protótipo

Capítulo 5, Resultados.

Capítulo 6, Conclusões.

Seguidamente, é apresentada uma descrição mais detalhada do conteúdo de cada capítulo. Com vista a cumprir os objetivos que foram propostos, esta dissertação está dividida em seis capítulos.

No Capítulo 1, Introdução, apresenta-se o enquadramento e a motivação que conduziu ao desenvolvimento do trabalho, as questões e hipóteses de investigação e abordagem que se pretende adotar. Indicaram-se os objetivos do trabalho, as respetivas contribuições originais e a organização deste trabalho.

No Capítulo 2, Estado da Arte, é apresentada a revisão da literatura de trabalhos anteriores relacionados com o tema de TESC. Inicialmente, é apresentada uma revisão de questões relacionados com um sistema de TESC por acoplamento indutivo ressonante. De seguida é analisada a TESC e a transferência de dados sem fios em simultâneo com enfoque na visão geral sobre os protocolos de comunicação sem fios adequadas para sistemas de TESC. É feita uma revisão de diferentes métodos de redução de emissões EM irradiadas pelos sistemas de TESC e de avaliação dos campos EM produzidos pelos sistemas de TESC.



No Capítulo 3, são apresentados os aspectos gerais dos campos eletromagnéticos e o impacto das emissões eletromagnéticas irradiadas pelos sistemas de TESC. São discutidos os limites de segurança e os níveis de referência na exposição à radiação eletromagnética. É também discutido o regime regulatório de sistemas de TESC apresentando no Anexo 1 as organizações envolvidas na elaboração de normas. É apresentada a comparação entre vários protocolos de comunicação entre o Tx e o Rx e selecionada uma solução adequada para a transmissão de dados no sistema de TESC.

No Capítulo 4 é descrito o sistema de TESC que opera nos valores de frequência da ordem dos kHz. São apresentados os aspectos fundamentais associados a modelação de protótipos para o Caso de Estudo\_1 e para o Caso de Estudo\_2. Ainda, neste capítulo são apresentados a implementação e o desenvolvimento do protótipo experimental de TESC simultaneamente com transmissão de dados sem fios. São apresentados a implementação do sistema de transmissão de dados sem fios entre o Tx e o Rx e o desenvolvimento da aplicação computacional que permite a sintonização da frequência funcionamento do protótipo para o regime de ressonância.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados da simulação e da medição dos campos elétricos irradiados pelos sistemas de TESC, considerando dois casos de estudo para diferentes distâncias entre a bobina Tx e a bobina Rx. É apresentada a comparação dos resultados numéricos das simulações computacionais com os valores resultantes das medições do campo elétrico irradiado pelos sistemas. Ainda, neste capítulo é apresentado o Caso de Estudo\_3 que tem por objetivo validar o funcionamento do protótipo experimental de sistema de TESC com o sistema de transmissão de dados sem fios entre o Tx e o Rx implementado. É apresentada a avaliação do funcionamento da aplicação computacional desenvolvida para a sintonização do sistema para frequência de ressonância.

No Capítulo 6, é apresentada a conclusão deste trabalho sobre o tema da transferência de energia sem contacto no âmbito do estudo de emissões do campo elétrico e do funcionamento do canal de comunicação entre o transmissor e o recetor. Ainda são indicadas linhas de investigação para futuros desenvolvimentos.

## 1.6 Notação

Em cada um dos capítulos deste trabalho é utilizada a notação mais usual na literatura especializada, harmonizando, sempre que possível, aspetos comuns a todos os capítulos. Contudo, quando necessário, em cada um dos capítulos é utilizada uma notação apropriada. As expressões matemáticas, figuras e tabelas são identificadas com referência ao capítulo em que são apresentadas e são numeradas de forma sequencial no capítulo respetivo, sendo a numeração reiniciada quando se transita para o capítulo seguinte. A identificação de expressões matemáticas é efetuada através de parênteses curvos ( ) e a identificação de referências bibliográficas é efetuada através de parênteses retos [ ]. Os símbolos em **negrito** indicam grandezas vetoriais.

Este trabalho está escrito em conformidade com o acordo ortográfico português de 29 de julho de 2008.

---

# CAPÍTULO

# 2

---

## Estado da Arte

*Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura de trabalhos anteriores relacionados com o tema de TESC. Inicialmente, é apresentada uma revisão de questões relacionados com um sistema de TESC por acoplamento indutivo ressonante. De seguida é analisada a TESC e a transferência de dados sem fios em simultâneo com enfoque na visão geral sobre os protocolos de comunicação sem fios adequadas para Sistemas de TESC. É realizada uma revisão de diferentes métodos de redução de emissões EM irradiadas pelos sistemas de TESC e de avaliação dos campos EM produzidos pelos sistemas de TESC.*

## 2.1 Introdução

Na última década foram feitos progressos na área da TESC recorrendo ao acoplamento indutivo ressonante para incrementar o rendimento do sistema [Kurs07, Karalis08, Cannon09, Sample09, Imura10]. Os avanços tecnológicos tornam a TESC por acoplamento indutivo ressonante muito atraente para as aplicações de carregamento de baterias de VE em cenários de carregamento quer seja estacionário, quer seja dinâmico.

A transmissão de dados, i.e., a troca de informações entre o Tx e o Rx, nomeadamente, identificação do veículo, frequência, potência necessária desempenham um papel importante no carregamento de baterias sem contacto e permitem melhorar o rendimento de TESC. O sistema de TESC com as tensões e correntes de emissões EM induzidas pode influenciar negativamente o canal de comunicação. Assim, é essencial analisar o impacto das emissões EM irradiadas pelo sistema de TESC sobre o canal de dados e garantir que as mesmas não influenciem nem perturbem a comunicação entre o Tx e o Rx.

É também de destacar que o processo de TESC a elevados valores de energia é acompanhado pela irradiação de energia EM para o ambiente circundante, neste caso absorvida por seres vivos nas imediações próximas do VE durante o carregamento da bateria. Ainda que as normas internacionais apenas se referem ao impacto do campo EM sobre o corpo humano, neste trabalho é referido o impacto do campo EM sobre os seres vivos. Portanto, é importante avaliar a exposição dos seres vivos às emissões EM induzidas pelo sistema de TESC comparando resultados com níveis de exposição permitidos pelas normas internacionais.

## 2.2 Acoplamento Indutivo Ressonante

Na bibliografia disponível são propostas direções de investigação, abordagens e técnicas incluindo arquiteturas de sistema [Sample09, Kurs10, Cannon09, Chen10, Kim10, Kim11], desdobramento de frequência (*frequency splitting*) [Sample09,

Cannon09, Hoang12, Jianyu13, Lyu15], adaptação de impedância (*impedance matching*) [Valtchev90, Sample09, Beh10a, Chen10, Cheon11, Koizumi12, Beh13, Yamakawa14], modelos de sintonização de frequência de operação para o regime de ressonância [Hoang12, Brusamarello13, Hu14, Ishihara14, Kar14, Zhang14, Ozdemir17], aplicações práticas [Imura09a, Yokoi11, Koizumi12, Jolani13, Yamakawa14].

Em [Hoang12] são analisados os três tipos de sistema de acoplamento entre as bobinas apresentados na Figura 2.1.

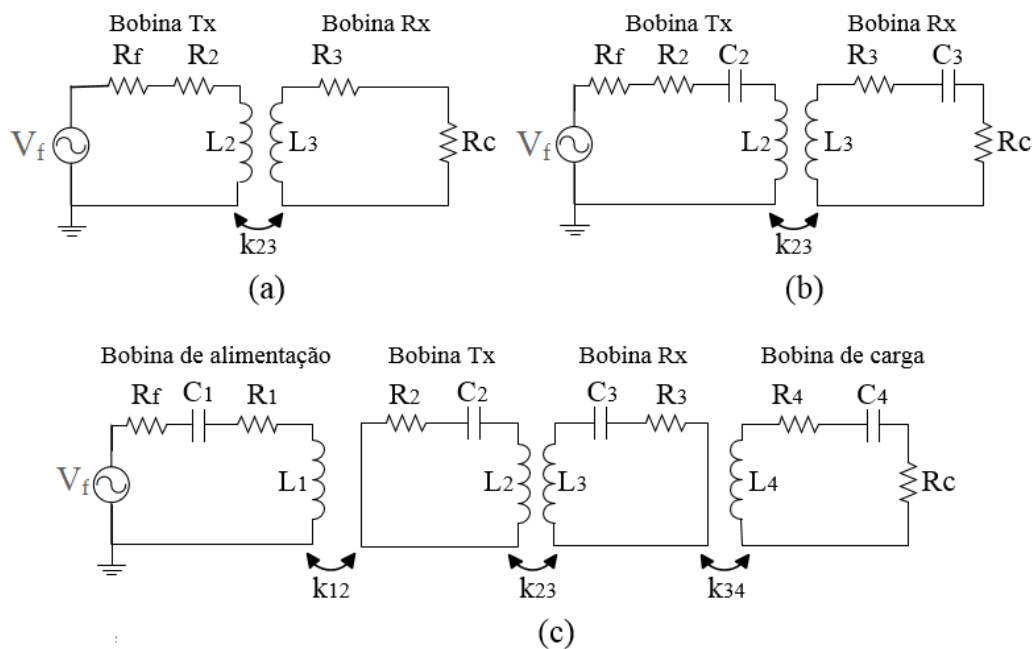


Figura 2.1 – Diferentes mecanismos de acoplamento: (a) acoplamento indutivo não ressonante; (b) acoplamento indutivo ressonante com baixo  $Q$ ; (c) acoplamento indutivo ressonante com alto  $Q$ .

O circuito de acoplamento indutivo não ressonante na Figura 2.1 (a) é semelhante a um transformador, onde duas bobinas partilham um fluxo magnético. Uma vez que a transferência de energia é baseada no princípio da indução magnética, é impossível obter um elevado rendimento devido à energia dissipada ao longo da bobina no meio ambiente [Hoang12].

A limitação anterior pode ser superada recorrendo ao acoplamento indutivo ressonante de duas bobinas, conforme apresentado na Figura 2.1 (b). Ao adicionar

ao sistema condensadores externos as bobinas Tx e Rx podem entrar em regime de ressonância para a mesma frequência. Uma das características do sistema TESC é o fator de qualidade que do ponto de vista físico é definido como a razão entre a energia armazenada e a energia dissipada em cada ciclo de funcionamento. O fator de qualidade define as propriedades ressonantes do circuito e deve ser o mais alto possível [Sample09]. O fator de qualidade para um indutor, i.e., bobina Tx e Rx é dado por:

$$Q = \frac{\omega L_i}{R_s} \quad (2.1)$$

sendo  $L_i$  indutância própria de bobina Tx ou Rx, respetivamente,  $R_s$  resistência em série com respetiva bobina.

O fator de qualidade neste caso é determinado pelas resistências  $R_f$  (resistência interna da fonte de CA) e  $R_c$  (resistência de carga). A  $R_f$  e  $R_c$  além de contribuírem para as perdas nos circuitos, também são causa do baixo fator de qualidade  $Q$ , o que reduz o rendimento do sistema. Uma solução para incrementar o fator de qualidade é separação das resistências  $R_f$  e  $R_c$  dos circuitos ressonantes, recorrendo a um conjunto de quatro bobinas, tal como é apresentado na Figura 2.1 (c) [Hoang12]. Estas bobinas estão ligadas entre si através de um campo magnético, caracterizado por coeficientes de acoplamento  $k_{12}$ ,  $k_{23}$  e  $k_{34}$ .

A configuração de TESC da primeira geração são baseados no método de acoplamento indutivo ressonante e consiste em duas bobinas ressonantes acoplados com baixo valor de perdas [Zhu08]. No entanto, o rendimento destas configurações da primeira geração ainda é reduzido. Para ultrapassar esta limitação vários circuitos ressonantes são implementados entre as bobinas ligadas à fonte e à carga alargando a distância de transferência efetiva. Têm sido analisadas arquiteturas de circuitos com três [Zhu08, Kim11, Park12] ou quatro bobinas ressonantes [Kurs07, Karalis08, Sample09, Cannon09, Imura10, Cheon11, Koizumi12, Beh13, Yamakawa14].

Em [Kim11] é apresentado um estudo do rendimento de um sistema de TESC por acoplamento indutivo ressonante utilizando uma bobina intermediária. A bobina intermediária é colocada numa disposição geometricamente perpendicular às bobinas Tx e Rx respetivamente. Esta disposição permitiu incrementar o rendimento do sistema e a distância entre o Tx e o Rx.

Em [Kurs10, Cannon09, Kim10] é estudado um sistema de TESC utilizando uma bobina Tx e múltiplas bobinas Rx. De acordo com o estudo, a utilização de múltiplas bobinas Rx pode melhorar o rendimento global do sistema de TESC, mesmo se a eficiência da transferência para cada Rx individual seja relativamente baixa. No entanto, maior número de bobinas implica mais trabalho de ajuste para obter todos os parâmetros do sistema alinhados. Pode ser difícil manter o desempenho ideal em alguns ambientes hostis para as aplicações práticas. Equilibrando o desempenho, a complexidade e a confiabilidade, a estrutura simples de duas bobinas pode ser a melhor opção para algumas aplicações industriais ementas num sistema de TESC [Zhou14].

Uma questão fundamental nos sistemas de TESC, é maximizar o rendimento da transferência de energia. Em vários trabalhos são analisados os sistemas de TESC por acoplamento indutivo ressonante com grande potencial para a transferência de energia sem contacto e com rendimento mais elevado para distâncias na ordem de metros do que apresentam os sistemas de TESC por acoplamento indutivo [Kurs07, Karalis08, Zhu08, Cannon09]. No entanto, estas investigações são limitadas a frequência de ressonância fixa usada em sistemas onde o fator de acoplamento entre as bobinas Tx e Rx e a carga não variam.

A frequência de ressonância de bobinas Tx e Rx é uma função do acoplamento entre as bobinas Tx e Rx que por sua vez varia com a distância entre as mesmas [Sample09]. Alias, a frequência de ressonância nos sistemas de TESC por acoplamento indutivo ressonante pode variar com as condições de carga, temperatura, humidade, o que baixa o rendimento do sistema [Imura09, Beh10a, Ishihara14].

Para melhorar o desempenho de sistemas de TESC por acoplamento indutivo ressonante é proposto o método de adaptação de impedâncias. A adaptação de impedâncias (*impedance matching*) é um dos métodos comumente usado em sistemas de transferência de energia e sistemas de comunicação e geralmente envolve a inserção de um circuito correspondente (como o circuito LC) para minimizar a reflexão de energia do sistema. Este método permite manter o regime de ressonância nos sistemas de TESC apesar da variação da distância entre as bobinas ressonantes, e deste modo garantir o alto rendimento do sistema [Beh10a]. Em [Sample09, Beh10a, Chen10, Cheon11, Beh13, Koizumi12, Yamakawa14] é abordado o método de adaptação de impedâncias.

Em [Beh10a, Beh10b] são apresentados os sistemas de TESC por acoplamento indutivo ressonante para uma frequência de ressonância fixa na ordem dos 13.56 MHz. Com o objetivo de melhorar o rendimento, é proposta a utilização de uma malha de adaptação de impedâncias para sintonizar a frequência de ressonância do sistema para a frequência da fonte de energia. Os resultados de simulação e experimentais mostram que a frequência de ressonância do sistema pode ser alterada usando malhas de adaptação de impedâncias para diferentes distâncias e orientações de bobinas Tx e Rx.

Para melhorar o desempenho dos sistemas de TESC são utilizados os diferentes métodos baseados em modelos de sintonização de frequência. Os modelos de sintonização de frequência consistem no ajuste automático do sistema para o regime de ressonância. São propostos os sistemas de TESC onde a variação de indutância [Hu14] ou capacitância [Hoang12, Zhang14,] do lado de Tx ou Rx permite controlar a frequência de operação e manter o regime de ressonância para obter o melhor rendimento de TESC. No entanto, estes sistemas permitem uma reduzida resolução da variação de frequência devido à limitação do número de comutações do circuito de afinação, o que, por sua vez limita o rendimento de TESC.



Outra abordagem para a afinação de frequência dos sistemas de TESC é apresentada em [Sample09, Ishihara14, Ozdemir17], sendo baseada na medição da potência total transmitida ou refletida em diferentes frequências distintas. Estes sistemas também modificam os incrementos entre as frequências discretas ou o número de pontos de frequência medidos para encontrar uma frequência correspondente ao regime de ressonância. Em [Ozdemir17] é proposto um algoritmo que pode ajustar a frequência para obter o melhor valor na transferência de energia. Usando as informações de valores de tensão e corrente da fonte, o sistema proposto verifica se há alguma alteração na potência transferida. Em seguida, a frequência de comutação do lado de Tx é ajustada no sentido de obtenção do melhor rendimento na TESC. A influência de meio ambiente e de distância na transferência de energia é minimizada. Embora as vantagens do algoritmo proposto foram verificadas pelos resultados da simulação, o mesmo não foi implementado na prática limitando à simulação em Matlab.

Em [Ishihara14] é apresentado um método de sintonização automática do sistema para o regime de ressonância para maximizar o rendimento de um sistema de TESC que possui grande capacidade em relação às variações de carga e de acoplamento entre as bobinas Tx e Rx. Para ajuste automático do sistema são implementados dois MCs com comunicação WLAN (Wireless Local Area Network) estabelecida. Os valores das tensões e correntes do lado Tx e Rx são enviados para os MCs calculando e avaliando a taxa das tensões  $V_{out}/V_{in}$  e a potência aos terminais da carga  $P_{out}$ . Para manter a taxa das tensões  $V_{out}/V_{in}$  numa faixa desejada correspondente ao regime de ressonância, o sistema procede ao incremento ou redução de tensão do lado de Tx via WLAN. Assim, o sistema pode maximizar o rendimento mantendo a potência aos terminais da carga  $P_{out}$  num determinado intervalo de valores.

Mais uma alternativa para afinação de frequência de funcionamento para o regime de ressonância é o ajuste direto da frequência do Sintetizador digital direto de frequência variável (*DDS, Direct Digital Synthesizer*) [Kar14]. O DDS é usado

para gerar os sinais de alta frequência que comutam o conversor de potência. Os sinais da corrente e da tensão são monitorizados na entrada da bobina Tx com a ajuda de sondas de tensão e corrente. O ajuste da frequência de operação para o regime de ressonância é feito baseando na comparação de fases da corrente e tensão do lado Tx. O dispositivo lógico programável *FPGA (Field Programmable Gate Array)* varia a frequência do DDS até que os dois sinais estejam em fase. Recorrendo ao sistema proposto de ajuste de frequência, o rendimento da transferência de energia melhorou de 64% para 75%, ajustando a frequência de operação inicial de 30,8 kHz para a frequência de ressonância real de 32,10 kHz. Esta alternativa apresenta uma vantagem em propor uma solução mais compacta pois o DDS pode ser integrado num *chip* reduzindo assim o volume do equipamento de TESC.

Um dos fenómenos que pode influenciar negativamente o rendimento da transferência de energia nos sistemas de TESC é o desdobramento das frequências (*frequency splitting*). Os estudos revelam que no caso da transferência da energia para longas distâncias, na ordem de metros, o sistema de TESC tem apenas uma frequência de ressonância estável com desempenho eficiente. À distância mais reduzida, a frequência de ressonância do sistema irá desviar-se de  $\omega_0$  e pode ocorrer o fenómeno de desdobramento de frequência, quando a resposta em frequência possui dois máximos. O desdobramento da frequência incrementa a instabilidade do sistema e dificulta o controlo do mesmo [Hoang12]. O desdobramento de frequência [Jianyu13] em função do coeficiente de acoplamento magnético  $k$  é apresentado na Figura 2.2. O coeficiente de acoplamento magnético  $k$  representa o nível de acoplamento entre as bobinas Tx e Rx, variando entre 0 (bobinas totalmente desacopladas) e 1 (acoplamento perfeito das bobinas), sendo dado por:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.2)$$

onde  $L_1$  e  $L_2$  são auto-indutâncias das bobinas Tx e Rx, respetivamente,  $M$  é indutância mútua entre as bobinas Tx e Rx.

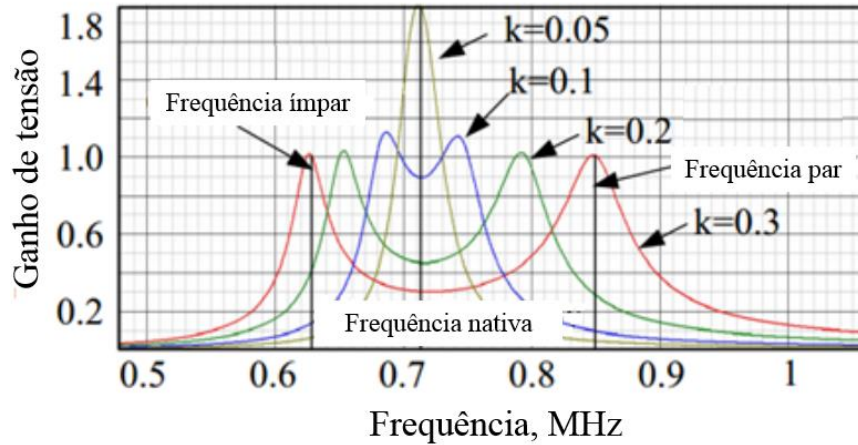


Figura 2.2 – Desdobramento das frequências.

Em [Lyu15] é referido que o desdobramento da frequência é essencialmente causado pela distribuição não uniforme do campo magnético da bobina ressonante e pelo excesso de acoplamento magnético entre o Tx e o Rx. Têm sido propostos vários métodos para corrigir o fenómeno de desdobramento da frequência. Em [Lyu15] são propostas duas bobinas, Tx e Rx, não idênticas para evitar o excesso do acoplamento magnético entre as mesmas. Deste modo o desdobramento da frequência pode ser suprimido ou completamente eliminado, podendo ser conseguido o campo magnético uniforme.

Os diferentes tipos de dispositivos de alta frequência podem ser descritos pelas ondas incidente e refletida, que se propagam nas linhas de transmissão ligadas aos mesmos. Em [Haus84] é referido que esta abordagem pode ser aplicada não somente às linhas de transmissão, mas também aos dispositivos eletrónicos de uma forma geral.

Em [Orfanidis13] é referido que a teoria de rede de duas portas pode ser uma ferramenta eficiente para o estudo dos sistemas de TESC. Em [Sample09, Beh10a, Beh10b, Li15b, Lyu15] tem sido proposta uma abordagem que permite estimar a energia transferida pelo coeficiente de transferência  $S_{21}$  que caracteriza a relação

entre a potência aos terminais da carga e a potência disponível na fonte. Este parâmetro pode ser obtido experimentalmente por um analisador de rede (*Vector Network Analyser*, VNA), que mede a amplitude e fase das ondas incidentes e refletidas.

Em [Sample09] a fim de caracterizar com precisão o sistema de TESC foram implementadas as técnicas de medição com uso de um analisador de rede para a extração dos parâmetros do circuito. Para alcançar o alto rendimento do sistema foi desenvolvido um algoritmo de ajuste automático que controla o regime correspondente ao máximo valor do coeficiente de transmissão  $S_{21}$ . O sistema de TESC com o ajuste automático da frequência de ressonância [Sample09] é apresentado na Figura 2.3.

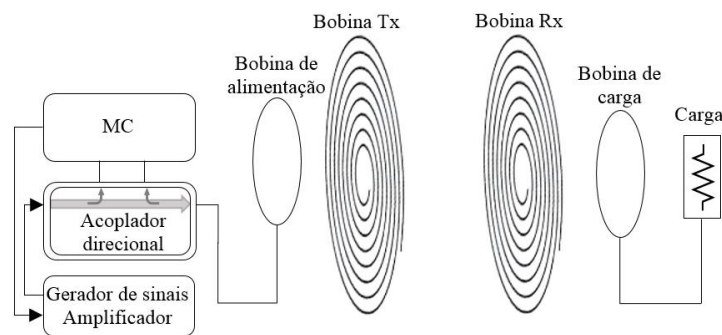


Figura 2.3 – Configuração simplificada do sistema de TESC com o ajuste da frequência.

Este sistema permite medir continuamente a energia transmitida e/ou refletida pela carga em função da frequência recorrendo a um acoplador direcional (*directional coupler*). O MC ao detetar a redução de energia transmitida para a carga e o incremento da energia refletida pela mesma, ajusta a frequência de operação mantendo-a o mais próximo ao regime ressonante. Deste modo pode ser alcançado o melhor rendimento na transferência de energia.

Os autores demonstraram o potencial do seu sistema de acoplamento indutivo ressonante para alimentar um computador portátil. Durante os testes do laboratório a bateria do computador portátil foi removida, e o sistema de TESC fornecia toda a energia necessária para o funcionamento normal do equipamento em questão com um rendimento de 50%.

## **2.3 Transferência de Energia e Transmissão de Dados**

As comunicações desempenham um papel fundamental nos sistemas de TESC. A transmissão de dados durante a TESC permite à unidade Tx detetar e identificar recetores e otimizar o processo de TESC incrementando ou reduzindo a energia transferida. Na literatura têm sido propostos diferentes métodos para a transferência simultânea de energia e transmissão de dados nos sistemas de TESC, visando incrementar o rendimento e a confiabilidade.

### **2.3.1 Métodos de transmissão de dados nos sistemas de TESC**

Nos sistemas de TESC em simultâneo com TDSF podem ser usados os circuitos ressonantes sintonizados numa única frequência de operação [Hmida07, Tibajia11, Wu12]. Para transmitir os dados em simultâneo com a transferência de energia nestes sistemas pode ser utilizada a modulação do sinal enviado pelo Tx. Nestes casos a frequência portadora tem um dos seus parâmetros, nomeadamente, amplitude, fase ou frequência, alterados em função da informação que se deseja transmitir.

Em [Hmida07, Tibajia11, Wu12] são estudados os sistemas TESC funcionando em simultâneo com sistemas de TDSF, recorrendo às diferentes técnicas de modulação do sinal transmitido, com a utilização de um só par de bobinas Tx e Rx. Em [Hmida07] o sistema de TESC e TDSF descrito funciona para uma frequência de 13.56 MHz e permite a transferência simultânea de energia e de dados com velocidades até 1 Mb/s. O princípio de operação é a modulação da frequência portadora por sinal de informação. Em [Wu12] é demonstrada a viabilidade de transferência de energia e transmissão de dados em simultâneo nos sistemas de TESC com a aplicação do método de modulação do sinal de amplitude.

No entanto, a aplicação do método de modulação nos sistemas de TESC reduz o rendimento de transferência de energia pois a operação de modulação do sinal

diminui a potência média do sinal modulado, mais em caso de modulação de amplitude do que nos outros tipos de modulação [Wu12].

Em [Bieler02, Rathge09] o sistema de TESC foi implementado utilizando dois conjuntos de bobinas, nomeadamente, o primeiro conjunto de bobinas é constituído pelo sistema de TESC e o segundo conjunto de bobinas é constituído pelo sistema de TDSF. Nestes casos, para transferir os dados da melhor forma possível é necessário melhorar o acoplamento mútuo entre as bobinas de dados Tx e Rx. Ao mesmo tempo é necessário reduzir o acoplamento mútuo entre as bobinas de energia e de dados em cada lado. Esta diminuição do acoplamento pode ser feita através de configuração especial de bobinas de dados. Neste caso a tensão induzida nas bobinas de dados pelo campo eletromagnético das bobinas de energia pode ser reduzida.

Em [Bieler02] foi estudado um sistema de TESC composto por dois conjuntos de bobinas funcionando à frequência de 150 kHz. Foram utilizadas diferentes configurações das bobinas para o sistema de TESC com sentido de reduzir a indutância mútua entre as bobinas de TESC e as bobinas da TDSF.

Em [Rathge09] foi proposto um sistema de TESC por acoplamento indutivo, que permite uma transmissão de dados para além da transferência de energia para o valor de potência aos terminais da carga de 1 kW à distância de 30 mm. Ao utilizar uma configuração especial da bobina para a transmissão de dados foi alcançada uma separação quase completa entre os canais de TESC e de TDSF. Foram modeladas e simuladas as interferências entre o sistema de transferência de energia e transmissão de dados. A configuração das bobinas quer para transferência de energia quer para transmissão de dados é apresentada na Figura 2.4 [Rathge09].

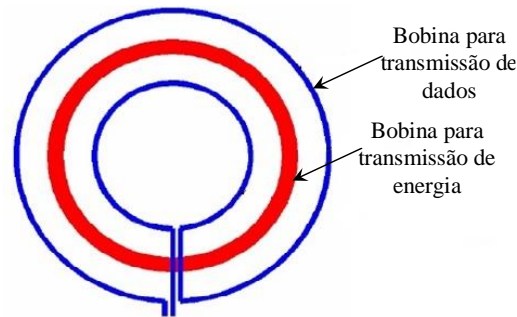


Figura 2.4 – Configuração das bobinas para TESC e TDSF.

No entanto, estes sistemas também apresentam desvantagens. A taxa de transmissão de dados e o rendimento de transferência de energia são limitados. A construção das bobinas ressonantes deve garantir um isolamento suficiente entre o sistema de transferência de energia e de transmissão de dados, o que é difícil de realizar.

Tais dificuldades podem ser evitadas se a frequência de transmissão de dados for mais elevada, nomeadamente, na ordem de GHz, mantendo a frequência para a transferência de energia na ordem de dezenas de kHz. O uso de frequências mais elevadas permite maior largura de banda disponível e maior taxa de transmissão de dados, i.e., velocidade de transmissão de dados mais elevada [Yashchenko14, Zlatanov15]. Estes fatores são conhecidos e são usados em telemóveis, onde o carregamento de baterias sem contacto é efetuado por meio de uma bobina ressonante distinta, que opera com valores da frequência na ordem de MHz. Ao mesmo tempo para a troca de dados são usadas antenas separadas, nomeadamente GSM, Wi-Fi.

Em [Yokoi11] é proposto um sistema de TESC por acoplamento indutivo ressonante com comunicação bidirecional entre o Tx e o Rx. O sistema tem a capacidade de alimentar uma carga até ao valor de potência de 1 kW para uma distância entre 100 mm e 300 mm, carregando uma bateria instalada num VE. A comunicação bidirecional é realizada recorrendo a um conjunto de dois MCs que trocam mutualmente de informação utilizando duas antenas ZigBee com frequência de operação 2.4 GHz. A função da comunicação entre o Tx e o VE é a

coordenação das condições de carregamento de bateria do VE. O sistema de TESC com comunicação bidirecional proposto em [Yokoi11] é apresentado na Figura 2.5.

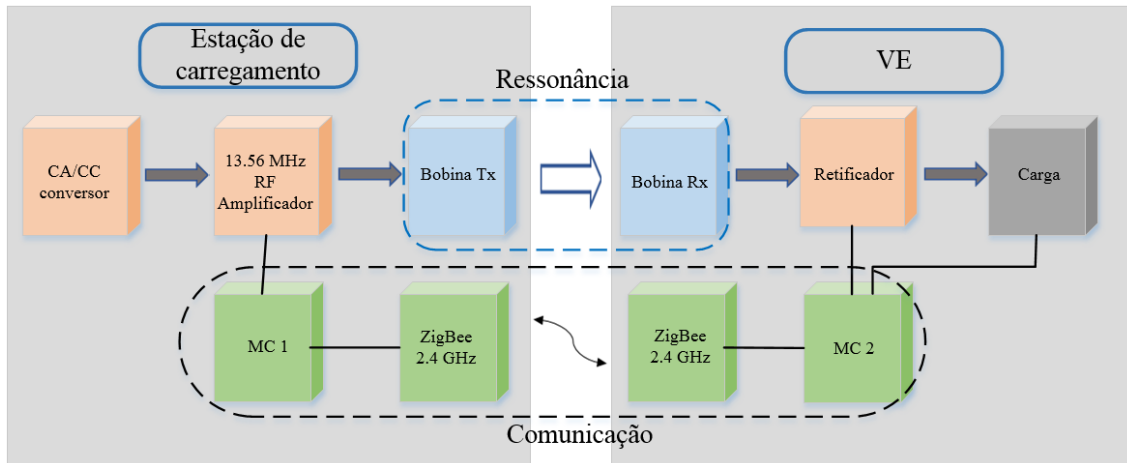


Figura 2.5 – Sistema de TESC com comunicação bidirecional.

O sistema está preparado para funcionar em três regimes:

- regime pré-ressonante, quando a potência aos terminais da carga tem o valor mínimo de 5 W para se verificar a condição de ressonância;
- regime de ressonância, quando a energia é transferida de acordo com o estado da carga da bateria conforme os dados transmitidos através do canal de comunicação para coordenar o processo de carregamento;
- regime de emergência, quando a transferência de energia é imediatamente cortada por razões de segurança no caso de o sistema detectar um erro fatal no processo de transferência de energia para o Rx. No entanto, em [Yokoi11] não são discutidos nem funcionamento do sistema de comunicação supostamente implementado, nem quaisquer outros detalhes de transmissão de dados no sistema de TESC descrito.

### 2.3.2 Transferência de energia e transmissão de dados na indústria

Um dos problemas enfrentados pela TESC é a falta de técnica uniforme entre os fabricantes para a transferência de energia. No mercado atual há especificações dos três principais consórcios que desenvolvem os sistemas de TESC: a Alliance for Wireless Power (A4WP), a Power Matters Alliance (PMA) e a Wireless Power



Consortium (WPC). Atualmente estão a ser desenvolvidos dois tipos de especificações de carregamento de baterias sem contacto. São técnicas desenvolvidas pelas alianças WPC e PMA, que se baseiam no princípio de indução magnética e a técnica proposta pelo consórcio A4WP, baseada na utilização do método de TESC por acoplamento indutivo ressonante designado de Rezence.

As técnicas atuais estabelecidas pelas WPC e PMA são baseadas em acoplamento indutivo, e são consideradas sistemas fortemente acoplados, onde o Rx e o Tx têm de ser cuidadosamente alinhados, pelo que, a distância entre o Rx e o Tx é limitada a alguns centímetros.

O padrão Rezence, desenvolvido pela A4WP e apoiado por cerca de 40 organizações, tais como, a Intel, Texas Instruments e Witricity, funciona por acoplamento indutivo ressonante. O padrão Rezence permite usar os sistemas de baixo acoplamento, que por sua vez deixe ao utilizador maior liberdade de posicionamento na direção x, y e z ao colocar um dispositivo na plataforma de carregamento de baterias. Os benefícios adicionais são a possibilidade de uma maior área de carregamento de baterias e a capacidade de carregar simultaneamente vários dispositivos. A desvantagem de uma solução de TESC por acoplamento indutivo ressonante é o incremento de emissões EM irradiadas pelo sistema [Joehren14]. O modelo do sistema TESC e de TDSF, i.e., o padrão Rezence, proposto por Alliance for Wireless Power (A4WP) [Tseng13] é apresentado na Figura 2.6.

O sistema apresentado na Figura 2.6 está baseado no acoplamento indutivo ressonante, tendo a capacidade para carregar uma ou várias baterias em simultâneo (auscultadores, smartphones). O bloco Tx é composto por uma fonte de alimentação, um processador de controlo, um circuito de adaptação de impedâncias, um amplificador de potência e uma bobina Tx. O lado Rx inclui uma bobina Rx, um retificador, um estabilizador de tensão e um processador de controlo. A A4WP recorreu à utilização de frequências distintas para a transferência de energia e de dados [Son13]. Para a transferência de energia é usada

a frequência de 6.78 MHz, tendo a A4WP selecionado como método *standart* para o canal de comunicação o protocolo Bluetooth ou o protocolo ZigBee. Estes protocolos operam à frequência de 2.4 GHz, o que é conveniente tendo em conta que os mesmos já existem em soluções móveis. A transmissão de dados à frequência de 6.78 MHz também é adequada para a identificação de diferentes Rx num cenário em que um Tx transfere a energia para vários dispositivos [Tseng13].

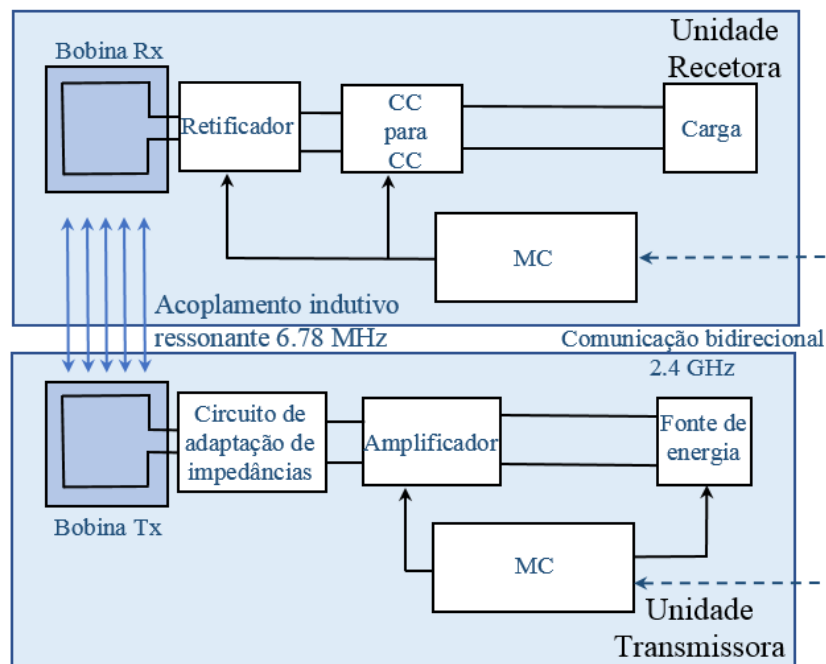


Figura 2.6 – Sistema de TESC e de TDSF proposto por A4WP.

O sistema tem a capacidade de alimentar uma carga até 6.5 W, no entanto a evolução do sistema prevê a alimentação de cargas entre 22 W e 50 W para carregamento de *tablets*, *netbooks* e *laptops* [Tseng13].

Os padrões promovidos pela PMA e pela WPC são bastante maduros, com muitos equipamentos já em uso no mercado de consumo. A PMA tem atualmente mais de uma centena de membros e conta com o apoio de AT&T, Sharp, Duracell, Powermat entre outros. A WPC foi criada em 2009 e atualmente reúne mais de 140 organizações, no qual se integram empresas como a Nokia, Motorola e Panasonic. Devido à dinâmica da economia mundial muitas grandes empresas

tiveram que se associar aos três consórcios ao mesmo tempo, tais como a Samsung, LG, Sony, Broadcom e Qualcomm.

O consórcio WPC, criado em 2009, desenvolveu em 2011 o padrão Qi, para carregamento de telefones sem contacto, que teve êxito no mercado. Em 2014 a Wireless Power Consortium anunciou que vai adicionar o padrão Qi para o carregamento de baterias por acoplamento indutivo ressonante.

Para que a transferência de energia seja bem-sucedida, o Tx precisa de ter o Rx acoplado corretamente. Nas soluções WPC e PMA, o Tx procura (*ping*) periodicamente o Rx. No momento em que o Rx é detetado, dá-se o início ao processo de transferência de energia. Para proporcionar a transferência de dados é utilizada a modulação por frequência para o Tx e Rx poderem comunicar. Também são utilizados outros métodos de comunicação, nomeadamente, através da modulação por amplitude, potência, corrente e por largura de impulso (*Pulse Width Modulation, PWM*) [Tseng13].

Em janeiro de 2014 a A4WP e a PMA decidiram unir os seus padrões para soluções nos sistemas de TESC. Como resultado da fusão entre a PMA e a A4WP, em junho de 2015 foi constituída a AirFuel Alliance (AFA), estando no seu conselho de administração algumas das empresas importantes, nomeadamente, a AT&T, a Intel, a On Semiconductor, a Powermat, a Samsung e a WiTricity.

## 2.4 Emissões Eletromagnéticas

Em [Obayashi14] é mencionado que a visão geral e ampla sobre vários problemas de CEM nos sistemas de TESC e de TDSF em simultâneo ainda não foi relatada. Até agora na literatura existe um número limitado de estudos sobre a redução dos efeitos nocivos desses sistemas no corpo humano. O efeito das emissões de EM irradiadas e das interferências em outros dispositivos eletrónicos tem sido negligenciado, e sua influência potencial não foi suficientemente estimada [Kong15]. Considerando o número limitado de estudos na literatura disponível sobre o funcionamento simultâneo dos sistemas de transferência de energia e de

transmissão de dados é ainda mais evidente a necessidade de investigação nesta área.

Qualquer sistema de TESC é uma fonte de emissões EM irradiadas em torno das bobinas Tx e Rx. O campo EM também pode gerar perdas por correntes de Foucault em materiais condutores que se encontram na vizinhança. Para superar esses inconvenientes é muito importante tomar medidas para atenuar os valores de campo EM produzido pelo sistema de TESC.

Em [ICNIRP98] é mencionado que a ICNIRP investiga e regulamenta os procedimentos na área da proteção contra as radiações não ionizantes. A ICNIRP desenvolveu e estabeleceu uma série de restrições básicas e os níveis de referência para a quantidade de radiação à qual os seres vivos podem ser expostos dentro dos limites de segurança. Todavia, os estudos de alternativas para a redução dos valores dos campos EM produzidos pelos sistemas de TESC, apenas nos últimos anos começaram a atrair o interesse dos investigadores [Monti18].

Em [Ott09] é referida a existência de técnicas para reduzir as emissões do campo EM. Em [Huertas09, Ahn10, Yokoi11, Cruciani13, Kim13a, Kim14a, Kim14b, Jinghe14] são analisados os sistemas de TESC e propostos alguns métodos de supressão de emissões EM irradiadas neste processo de transferência de energia.

Em [Ahn10] são apresentadas técnicas para a redução dos campos EM gerados pelos cabos subterrâneos e pelo próprio VE. Através da aplicação de um escudo constituído por uma chapa metálica montada no fundo do VE e conectada por meio de uma espécie de escovas com os escudos horizontal e vertical térreos, o valor do campo EM ficou significativamente reduzido. Os resultados da simulação e da medição dos valores do campo EM irradiado para os VE que atualmente se encontram em serviço também foram apresentados.

Em [Kim14a] são analisadas as emissões EM no sistema de TESC por acoplamento indutivo ressonante para alimentar um aparelho de televisão. Foi apresentado e analisado o comportamento de circuitos ressonantes com topologias

em série e em paralelo, com a bobina Rx para dois cenários de supressão de ruído do campo EM, nomeadamente, um escudo ferromagnético e uma blindagem metálica. Também foi medido e caracterizado o ruído do campo EM do Rx para essas topologias, chegando à conclusão que o Rx com a topologia em série é mais vantajoso do ponto de vista de emissões EM irradiadas pela bobina Rx.

Em [Kim14b] são analisadas a geração, a redução e a medição de emissões do campo EM provenientes do sistema de carregamento de bateria de um VE sem contacto. São discutidas as metodologias de blindagem para os campos EM, nomeadamente, a blindagem metálica, o uso de um escudo de material magnético, as blindagens ativa e reativa, assim como as suas vantagens e limitações. As blindagens propostas em [Kim14b] são apresentados na Figura 2.7. Para autores as blindagens ativa e reativa, respetivamente, são as mais eficientes. As blindagens passivas têm limitação no posicionamento físico do escudo para manter uma determinada distância em relação ao campo EM do sistema de TESC. A blindagem reativa é a mais vantajosa por causa de seu baixo custo, peso reduzido e funcionamento eficaz.

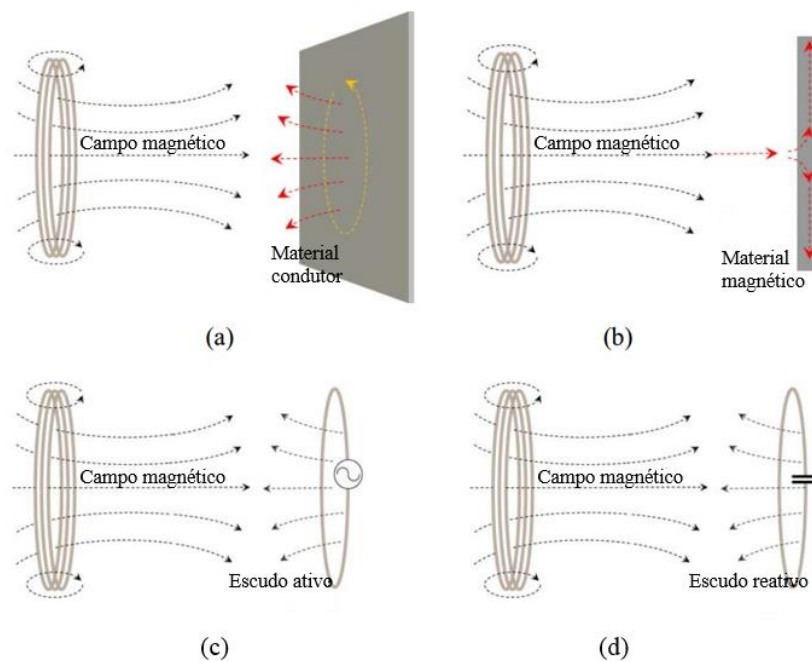


Figura 2.7 – Blindagens: (a) condutora; (b) com escudo magnético; (c) escudo ativo; (d) escudo reativo.

Em [Cruciani13] são propostas as diferentes de blindagens do campo EM produzido por um sistema de TESC que opera na frequência de 20 kHz. Neste trabalho são apresentados os resultados de comparação das técnicas de escudos magnéticos, blindagens condutoras e bobinas passivas. Os autores chegam à conclusão que devido às perdas de energia e a reflexão do campo o uso de blindagem condutora nem sempre é compatível com o funcionamento do sistema de TESC. O escudo magnético com topologia de forma aberta é o mais adequado, uma vez que não altera o desempenho do sistema de TESC. No entanto, o uso de escudo magnético conduz a uma mudança na frequência operacional, o que pode ser corrigido por uma compensação capacitiva.

Em [Kim13] são introduzidos os princípios fundamentais de um sistema de TESC baseado no acoplamento indutivo ressonante. São descritos a formação da distribuição do campo magnético e métodos de supressão de ruído do mesmo. Além das blindagens passivas foi apresentado o método de cancelamento do campo magnético recorrendo a uma malha de ressonância de corrente reativa e utilização destes métodos em *on-line electric vehicle*, OLEV. Com a utilização da malha de ressonância de corrente reativa foi alcançado um nível aceitável de exposição humana ao campo EM, uma vez que este se encontra abaixo de normas internacionais publicados por ICNIRP.

Em [Jinghe14] é proposta uma nova estrutura de blindagem de ferrite de manganês zinco de alta permeabilidade magnética para reduzir as emissões do campo EM no sistema de TESC com uma potência de 8 kW e de 10 kW, respetivamente. Foram comparados os resultados de simulação e de distribuição do campo EM num sistema de TESC sem blindagem e com blindagem. As simulações e os resultados experimentais indicam que a nova estrutura de blindagem não só reduz o campo EM de dispersão do sistema, mas também melhora o coeficiente de acoplamento entre as bobinas Tx e Rx.

A referência [Huertas09], ainda que não esteja diretamente relacionada com os sistemas de TESC, é citada neste trabalho porque trata sobre a influência do ruído

EM produzido por linhas de transmissão elétrica no nível de tensão de 400 kV sobre o canal de TDSF. O canal de TDSF foi implementado num sistema robótico para a monitorização das linhas de alta tensão. A fonte da transmissão de dados está localizada dentro do campo EM, e a estação de receção de dados está localizada às diferentes distâncias das linhas de transmissão de alta tensão. A análise foi concentrada em medições por analisador de espectro de radiofrequências (RF) de emissões EM irradiadas na banda de 900 MHz, em que a TDSF é supostamente operada. A fim de avaliar o desempenho do sistema de TDSF na presença de emissões EM irradiadas pelas linhas de alta tensão, foi realizada a medição da taxa de bits errados (*Bit Error Rate*, BER), também conhecida como a probabilidade de erro da transmissão de dados. O índice BER é definido como o número de erros na transmissão dividido pelo número total de bits enviados durante um intervalo de tempo especificado. Os resultados dos ensaios experimentais mostraram que a presença do campo eletromagnético de 400 kV cria emissões EM que reduz em 70 % a distância de TDSF realizada na frequência de 900 MHz.

## **2.5 Avaliação das Emissões EM dos Sistemas de TESC**

Nos últimos anos o interesse na TESC, especialmente para o carregamento de baterias de VE, está a aumentar rapidamente. Como resultado da crescente aplicação de TESC nos equipamentos eletrónicos industriais e de consumo, são levantadas mais preocupações sobre a CEM, uma vez que os sistemas de TESC produzem emissões EM no ambiente circundante. Os equipamentos eletrónicos de consumo operam com valores de potência na ordem das dezenas de Watt. Em comparação, o equipamento comercial para carregamento de baterias de VE sem contacto opera com a potência na ordem desde alguns kW até dezenas de kW. Assim, é mais provável que o incremento do valor da energia EM irradiada neste último caso possa afetar adversamente não só os seres vivos, mas também outros equipamentos eléctricos e eletrónicos adjacentes [Kong15, Monti18].

As questões de CEM do sistema de TESC aumentam a necessidade de uma análise detalhada dos processos EM no corpo humano e restantes seres vivos expostos à energia eletromagnética irradiada. Em [Pinto17] é referido que o campo EM produzido pelo sistema de TESC é altamente não uniforme e pode exceder os níveis de referência estabelecidos pelos regulamentos internacionais. Considerando que o estudo "in vivo" da distribuição do campo EM no corpo humano é impossível, a única oportunidade de avaliar o impacto do campo EM nos seres vivos é através da modelação e simulação. Recentemente, alguns artigos foram publicados, discutindo a modelação e simulação de processos eletromagnéticos em sistemas de TESC e exposição humana.

Em [Agarwal15] é apresentado um sistema de TESC por acoplamento indutivo ressonante, que foi desenvolvido utilizando o método dos elementos finitos (*Finite Element Method*, FEM). Nesta publicação é apresentada a influência da aplicação de um material "met", conhecido como condutor magnético perfeito, no rendimento do sistema de TESC.

Em [Isaev16] é apresentado um modelo para a TESC com as bobinas de forma irregular. Os parâmetros do circuito, como indutância e resistência da bobina, são definidos através da avaliação do campo EM produzido pelo sistema, feita pelo FEM. É apresentada a distribuição espacial do campo EM para diferentes distâncias entre as bobinas.

Em [Bosshard14] é apresentada a modelação do protótipo do sistema de TESC por acoplamento indutivo ressonante com uma potência de 5 kW e com a distância entre as bobinas Tx e Rx de 52 mm, usando a aplicação computacional Ansys Maxwell aplicando o FEM. São apresentados os métodos de cálculo para prever as perdas de energia, o campo magnético irradiado e valores de auto-indutâncias, indutância mútua e coeficiente de acoplamento entre as bobinas Tx e Rx. Os resultados da simulação são comparados com os valores do campo magnético irradiado medido do protótipo do sistema de TESC por acoplamento indutivo ressonante, apresentando um erro de cálculo de menos de 5%.



Em [Jorgetto15] são apresentados a metodologia de modelação por FEM e os resultados da simulação, aplicados ao desenvolvimento de um sistema de TESC. A partir das simulações FEM é obtido o campo magnético, a auto-indutâncias e a indutância mútua do sistema de TESC modelado. Através do uso do programa computacional Comsol foram confirmados os resultados teóricos da modelação proposta para um pequeno VE admitido como o caso de estudo.

Em [Chang14], é apresentado o *design* das bobinas de um sistema de TESC com análise por FEM e com simulação em Matlab. O coeficiente de acoplamento das bobinas, o rendimento e o melhor valor da energia transferida através do sistema são obtidos com base na simulação. A seguir, protótipo de TESC é implementado usando os dados obtidos da simulação. De acordo com a comparação dos resultados experimentais e de simulação é provado que a modelação baseada na análise de FEM e na simulação do Matlab é razoável e válida.

Em [Kim14c], um sistema de TESC com o valor de 5 kW de potência com topologia do circuito ressonante em série e em paralelo é analisado e implementado. É proposta uma blindagem reativa ressonante que permite reduzir efetivamente o campo magnético induzido por protótipo de TESC sem consumir energia adicional. A blindagem reativa ressonante é baseada no uso de uma bobina associada em série com um banco de condensadores. O sensor magnético dentro da área da bobina de blindagem mede periodicamente o campo magnético total produzido pelas bobinas Tx e Rx e pela bobina de blindagem. Os dispositivos de monitorização ajustam a capacitância do banco de condensadores para alterar o campo magnético induzido pela bobina de blindagem e, assim, minimizar o campo magnético total. A eficácia de blindagem reativa ressonante e seu efeito no rendimento do sistema de TESC são analisados com simulação em FEM e medições. Os resultados demonstram que o campo EM pode ser suprimido em 64 % usando um escudo reativo ressonante. A distribuição do campo magnético simulado sem (a) e com (b) escudo reativo ressonante [Kim14c] é apresentada na Figura 2.8.

Em [Wen17] o FEM é utilizado para estudar o campo EM produzido pelo sistema de TESC. Os efeitos do campo elétrico induzido no corpo humano pelo sistema de TESC e a taxa de absorção específica (*Específica Absorto Rate*, SAR) também são simulados e avaliados.

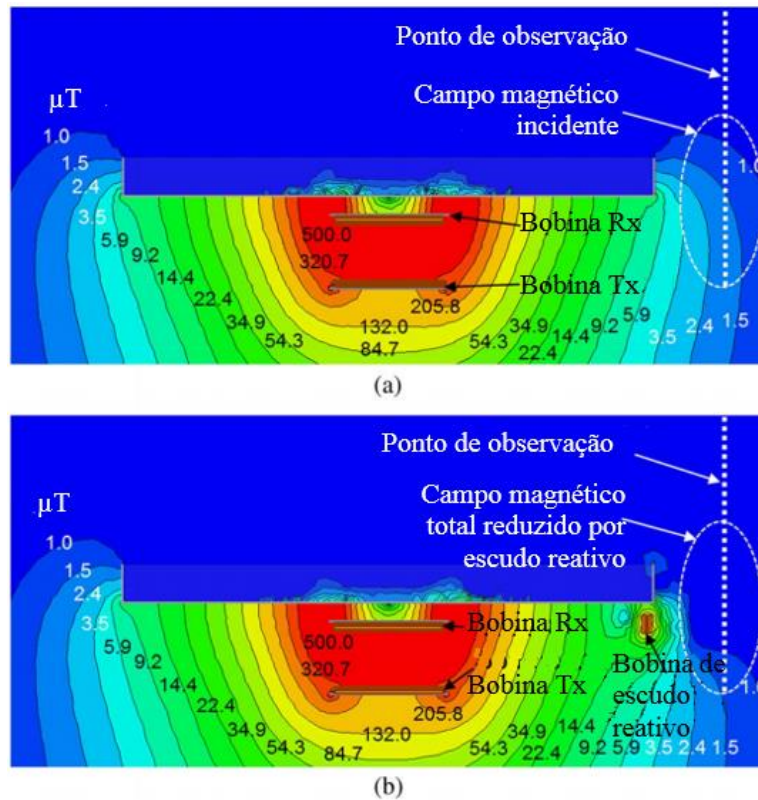


Figura 2.8 – Distribuição do campo magnético simulado:  
(a) sem escudo reativo ressonante; (b) com escudo reativo ressonante.

Em [Mude16] é apresentado o acoplamento indutivo de duas bobinas de um sistema de TESC para carregamento de bateria de um VE urbano. Aplicando uma análise por FEM são investigados os parâmetros indutivos em função da distância entre as bobinas Tx e Rx, do desalinhamento axial e do campo EM. É realizada a verificação da admissibilidade do campo EM para os seres vivos. Finalmente, os valores simulados dos parâmetros indutivos e do campo EM são validados por medições realizadas no protótipo.

Em [Laakso15], é modelado e simulado o campo magnético produzido pelo sistema de TESC considerando um VE real com valor de potência de 7 kW, usando o *software* Ansys Maxwell. Para validar o modelo, o campo magnético simulado

é comparado com o medido, mantendo o RMSE (*Root-Mean-Squared Error*) entre os valores de 0.72 e 0.86, respetivamente. Finalmente, foi avaliado o campo elétrico induzido em um modelo de corpo humano por um campo EM produzido pelo sistema de TESC.

## 2.6 Conclusões

Neste capítulo são abordados os conceitos associados aos sistemas de TESC. De acordo com a bibliografia disponível, para o sistema de TESC orientado para o carregamento da bateria de um VE, a técnica de acoplamento indutivo ressonante é reconhecida como a mais adequada. No que se refere às emissões EM de alta intensidade irradiadas pelo sistema de TESC, é referido que estas podem influenciar de forma adversa quer os seres vivos quer o canal de comunicação.

---

## CAPÍTULO

# 3

---

### Impacto das Emissões Eletromagnéticas Irradiadas

*Neste capítulo são apresentados os aspetos gerais dos campos eletromagnéticos e o impacto das emissões eletromagnéticas irradiadas pelos sistemas de TESC. É também discutido o regime regulatório de sistemas de TESC. São apresentados os limites de segurança e os níveis de referência na exposição à radiação eletromagnética. É também apresentada a comparação entre vários protocolos de comunicação entre o Tx e o Rx e selecionada uma solução adequada para a transmissão de dados no sistema de TESC.*

### 3.1 Introdução

O interesse na TESC nos últimos anos está a crescer, nomeadamente, em equipamentos eletrónicos comerciais para o carregamento de baterias. À medida que aumenta o número de equipamentos comerciais que utilizam a TESC, a CEM introduz desafios significativos para a implementação de tais sistemas [Kong15]. No entanto, a bibliografia disponível sobre os sistemas de TESC ainda está concentrada em melhorar o rendimento de transferência no sentido de incrementar o valor da energia transferida [Kong14]. Assim, ainda existe uma lacuna na bibliografia relacionada com questão de CEM aplicada às TESC.

O valor da potência aos terminais da carga, necessária para a implementação à escala comercial de sistemas de TESC, é substancial [Lin13]. De acordo com as especificações do WPC e da AFA [AFA16], os valores da potência para o carregamento de baterias via sistemas de TESC são da ordem de 5 W a 15 W para dispositivos móveis, até 100 W para equipamento eletrónico de consumo e até 2 kW para equipamento de cozinha. No caso dos VEs os valores da potência de carregamento de baterias podem variar entre 3.3 kW e 22 kW para os VE ligeiros e de 100 kW ou superior para os VE pesados [Park16, ITU17]. O incremento contínuo do valor da energia transferida sem contacto e da distância de transferência levanta preocupações quanto à CEM, devido às emissões EM na zona circundante do sistema de TESC. Existe uma preocupação crescente com a segurança relacionada com exposição humana a campos elétricos, magnéticos e EM [Lin13, Ding14, Kim14c, Gao15, Laakso15, Wen17]. O campo EM irradiado pelo sistema de TESC pode não só apresentar perigo para os seres vivos, mas também influenciar adversamente outros equipamentos elétricos e eletrónicos adjacentes. Tendo em conta que o estudo da CEM do sistema de TESC é uma prioridade [Kim14b], é importante estimar o impacto das emissões EM irradiadas pelo sistema de TESC no ambiente, na saúde humana e no canal de dados.

## 3.2 Radiação Eletromagnética

### 3.2.1 Ondas eletromagnéticas

Os campos EM artificiais são produzidos por linhas de transmissão e de distribuição, radares, instalações emissoras de rádio e televisão, equipamento eletrodoméstico, antenas dos sistemas de comunicações móveis e de radiodifusão.

A propagação da energia EM é realizada através de ondas EM. Estas são constituídas por duas entidades interdependentes entre si: o campo elétrico,  $E$ , e o campo magnético,  $H$ . Enquanto que os campos elétricos estão associados apenas à presença da carga elétrica, os campos magnéticos são o resultado do movimento físico da carga elétrica, i.e., a corrente elétrica. O campo elétrico variável origina o campo magnético variável, por sua vez o campo magnético variável origina um campo elétrico que induz outro campo magnético e, assim, sucessivamente. Num meio sem perdas, numa onda EM plana, o campo elétrico  $\mathbf{E}$  e o campo magnético  $\mathbf{H}$  com fases simétricas são perpendiculares entre si e à direção de propagação, o que define a mesma como uma onda transversal. A onda EM plana é apresentada na Figura 3.1.

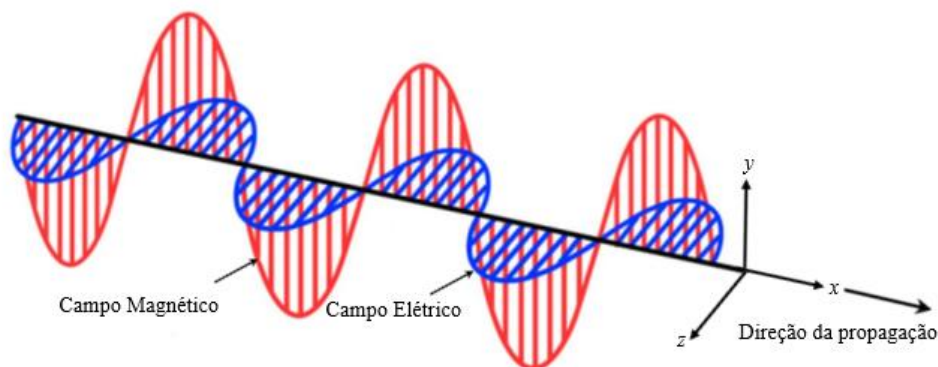


Figura 3.1 – Onda eletromagnética plana.

A velocidade de propagação da onda EM no vácuo e no ar é igual à velocidade da luz, i.e.,  $3 \times 10^8$  m/s, enquanto que a velocidade de propagação nos tecidos biológicos é mais reduzida.

As ondas EM podem ser caracterizadas pelo comprimento de onda, frequência e energia. Quanto maior for a frequência menor é o comprimento de onda, enquanto que a energia da onda EM é maior.

A energia associada a uma onda EM é definida pela grandeza física denominada de vetor de Poynting. O vetor de Poynting representa o produto vetorial entre os vetores do campo elétrico e campo magnético e é dado por:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (3.1)$$

sendo  $\mathbf{S}$  o vetor de Poynting [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $\mathbf{E}$  o vetor do campo elétrico [ $\text{V}/\text{m}$ ],  $\mathbf{H}$  o vetor do campo magnético [ $\text{A}/\text{m}$ ]. O vetor  $\mathbf{S}$  representa a densidade de potência da onda EM e é orientado na direção de propagação da mesma.

### 3.2.2 Espectro eletromagnético

As ondas EMs podem ser classificadas de acordo com a sua frequência, i.e., espectro EM, apresentado na Figura 3.2.

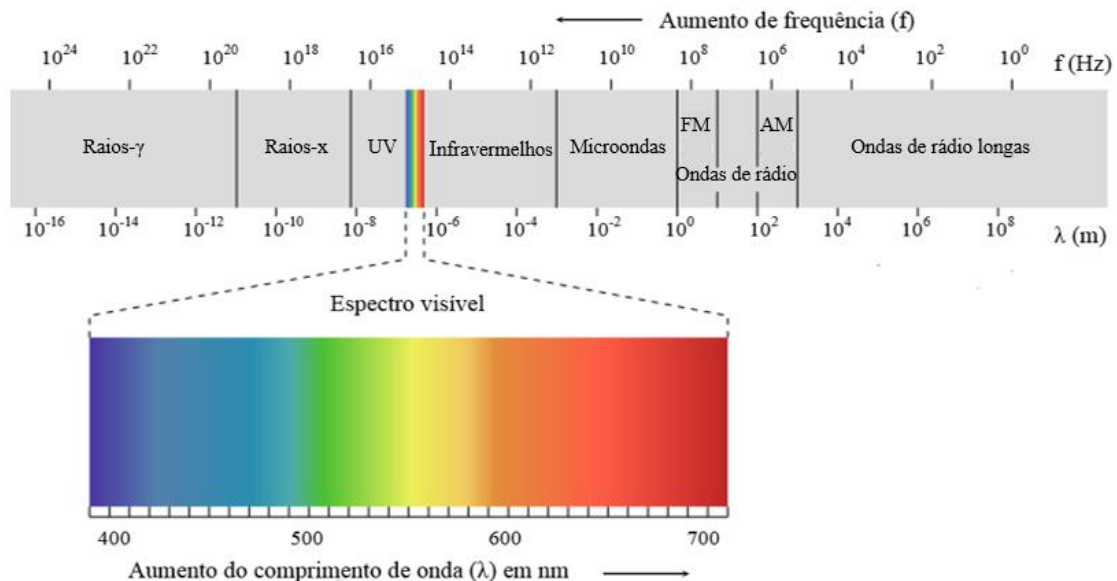


Figura 3.2 – Espectro eletromagnético.

A classificação das frequências no espectro EM de acordo com o comprimento de onda é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classificação das frequências

Frequência			Comprimento de onda
Abreviatura (em inglês)	Designação (em inglês)	Faixa	
ELF	Extremely low frequency	< 3 kHz	> 100 km
VLF	Very low frequency	3 kHz a 30 kHz	100 km a 10 km
LF	Low frequency	30 kHz a 300 kHz	10 km a 1 km
MF	Medium frequency	300 kHz a 3 MHz	1 km a 100 m
HF	High frequency	3 MHz a 30 MHz	100 m a 10 m
VHF	Very high frequency	30 MHz a 300 MHz	10 m a 1 m
UHF	Ultra high frequency	300 MHz a 3 GHz	1 m a 10 cm
SHF	Super high frequency	3 GHz a 30 GHz	10 cm a 1 cm
EHF	Extremely high frequency	30 GHz a 300 GHz	1 cm a 1 mm
THF	Tremendously high frequency	300 GHz – 3000 GHz	1 mm a 0.1 mm

De acordo com a definição do IEEE, a radiação de radiofrequência é uma banda do espectro EM que abrange uma gama de frequências entre 3 kHz e 300 GHz. Neste trabalho estão estudadas as RF baixas e muito baixas.

Em função da frequência, as ondas EM são normalmente classificadas em radiações não ionizantes e radiações ionizantes com a separação na zona da radiação ultravioleta (Figura 3.1). A radiação não-ionizante não tem energia suficiente para provocar quebras nas moléculas causando ionização. Por sua vez a radiação ionizante tem energia suficiente para que, ao interagir com um átomo, consiga remover elétrons da órbita do mesmo, provocando ionização. As fontes de radiação EM ionizante correspondem à parte do espectro EM com valores de frequência mais elevados, a partir da ordem dos  $10^{16}$  Hz [Stozharov07, Gherardini14]. Os efeitos prejudiciais da radiação ionizante para os seres vivos, mesmo em pequenas doses, são reconhecidos [Staebler17]. Entre os efeitos biológicos associados à radiação ionizante estão a leucemia, as cataratas ou as mutações genéticas. Em particular, os raios  $x$ , os raios  $\gamma$  e os neutrões são classificados como cancerígenos para o ser humano [IARC13]. A radiação não-



ionizante provoca outros efeitos biológicos, nomeadamente, o aquecimento do tecido biológico, as alterações de algumas reações químicas ou a indução de correntes elétricas em células e tecidos biológicos [IARC13, Rifai14, SCENIHR15].

### 3.2.3 Campo próximo e campo distante

As propriedades do campo EM dependem da distância da fonte. Em [Bienkowski12, Balanis05, ANACOM07] é referido que o espaço circundante à fonte de radiação EM é dividido em duas regiões, sendo a região do campo próximo e a região do campo distante. A região de campo próximo localizada mais perto da fonte do campo EM é dividida em região reativa do campo próximo e em região de radiação do campo próximo (região de Fresnel). A região reativa do campo próximo contém a maior parte da energia associada ao campo EM produzido. Na região do campo próximo os campos elétrico  $E$  e magnético  $H$  não possuem características de onda plana. Assim, no campo próximo, a relação entre o campo elétrico e o campo magnético não está bem determinada, i.e., num ponto qualquer da leitura, qualquer componente do campo pode dominar, enquanto apenas a uma curta distância domina outra componente [Balanis05, ANACOM07, Miclaus10, Bienkowski12]. Na região do campo próximo a relação entre  $E$  e  $H$  depende da estrutura da fonte de radiação EM, sendo uma função da direção e da distância entre o ponto de observação e a fonte [Balanis05, Miclaus10, Bienkowski12].

Na região do campo distante, também denominada de região de Fraunhofer o campo EM tem uma característica de onda plana [ANACOM07, Bienkowski12]. Na onda plana os campos  $E$  e  $H$  são ortogonais e relacionados pela impedância característica da onda dada por:

$$E = Z_0 H \quad (3.2)$$

sendo  $Z_0$  a impedância característica de uma onda plana no espaço livre. A  $Z_0$  depende da permissividade elétrica  $\epsilon_0$  e da permeabilidade magnética  $\mu_0$  do espaço livre sendo dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (3.3)$$

Considerando os valores da permissividade elétrica  $\epsilon_0$  e permeabilidade magnética  $\mu_0$  do vácuo (3.3) no SI é obtido o valor de impedância característica  $Z_0 = 377 \Omega$ .

Em [Balanis05] são definidos os limites do campo próximo e do campo distante em função da dimensão de antena  $D$ . Na região do campo próximo, onde predomina o campo reativo, i.e., região reativa, os limites são dados por:

$$0 < d < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (3.4)$$

sendo  $d$  a distância do centro da abertura da antena, i.e., distância da fonte de energia EM, ao ponto de observação,  $D$  a maior dimensão de antena,  $\lambda$  o comprimento da onda do campo EM.

As condições da região radiante do campo próximo são dadas por:

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq d < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.5)$$

As condições do campo distante são dadas por:

$$\frac{2D^2}{\lambda} \leq d \leq \infty \quad (3.6)$$

Na região do campo próximo o valor da impedância da onda pode ser diversificado significativamente. Sendo assim, para a caracterização do ambiente EM nesta região é necessário medir separadamente o campo elétrico e o campo magnético [ANACOM07]. Na região do campo distante a impedância de onda é igual à impedância característica do meio no qual se propaga [Sanches10]. Se a fonte de radiação EM é caracterizada por baixa tensão e elevada corrente, i.e.,  $E/H < 377 \Omega$ , o campo próximo é predominantemente magnético, como no caso das antenas em forma de anel (*loop*) que está abordado neste trabalho. Quando a fonte de radiação EM é caracterizada pela elevada tensão e baixa corrente, i.e.,  $E/H > 377 \Omega$ , o campo

próximo é predominantemente elétrico, como no caso das antenas do tipo dipolo. A variação de impedância de onda com a distância da fonte  $d$  normalizada para  $\lambda$  para as regiões de campo próximo e do campo distante é apresentada na Figura 3.3 [Colotti06, Sanches10].

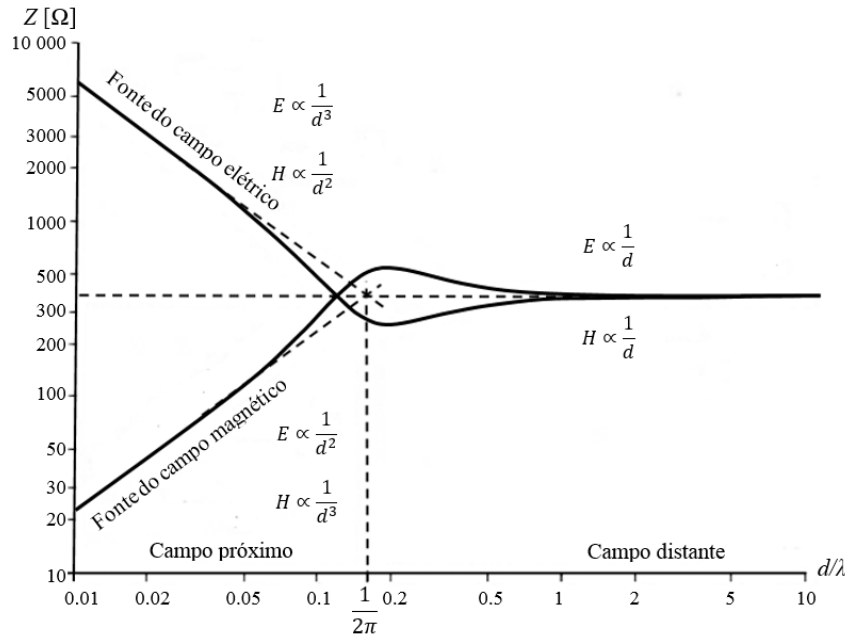


Figura 3.3 – Distância de transição (campo próximo - campo distante).

Na Figura 3.3 na região de campo distante ambos os campos  $E$  e  $H$  são interligados e sofrem de uma atenuação proporcional à  $1/d$ , formando uma onda plana. Na região de campo próximo um campo predominante gerado pela antena atenua na razão de  $1/d^3$  e outro campo atenua na razão de  $1/d^2$  [Ott09, Sanches10]. Nos sistemas de TESC estudados neste trabalho o campo magnético é predominante. Por esse motivo a pesquisa relacionada com as questões de CEM nos sistemas de TESC discute basicamente os campos magnéticos produzidos pelo sistema de TESC [Ahn10, Feliziani13, Chang14, Gao15, Isaev16, Pinto17]. No entanto o campo magnético atenua mais rápido com a distância do que o campo elétrico, i.e.,  $H \propto 1/d^3$  e  $E \propto 1/d^2$ . Tendo em conta a falta de pesquisa relativamente ao estudo dos campos elétricos irradiados pelo sistema de TESC seria importante de abordar este tema nos sistemas de TESC estudados, já que a atenuação do campo elétrico é mais baixa em comparação com a do magnético.

### **3.3 Impacto do Campo Eletromagnético sobre Saúde**

Como resultado do crescente uso da TESC nos equipamentos eletrônicos industriais e de consumo, são levantadas preocupações sobre a CEM, uma vez que os sistemas de TESC produzem emissões EM no ambiente circundante. A CEM aplicada aos sistemas de TESC está associada não só à proteção de um equipamento elétrico/eletrônico contra o impacto negativo das emissões EM que podem ocorrer na sua área circundante, mas também à proteção de saúde de seres vivos contra poluição EM produzida pelos sistemas de TESC.

#### **3.3.1 Efeito sobre o corpo humano**

A energia EM transferida pelo sistema de TESC e irradiada para o ambiente circundante é absorvida pelos seres vivos que se encontram nas imediações próximas. Alguns trabalhos de investigação afirmam que a TESC é segura para a saúde dos seres vivos [Kurs07], mas é impossível prever o impacto sobre a saúde dos seres vivos dessa exposição ao longo do tempo [Stozharov07, IARC13, Staebler17].

Um campo EM interage com o tecido biológico e pode ser refletido, transmitido, refratado ou disperso pelo corpo [Stozharov07, Staebler17]. Os campos refletidos e dispersos podem prosseguir em direções diferentes das do campo EM incidente, enquanto que os campos transmitidos e refratados interagem com o corpo biológico de maneiras diferentes. As interações com o corpo biológico dependem da frequência, da forma da onda e do valor do campo induzido, bem como da energia depositada ou absorvida no sistema biológico [SCENIHR15, Staebler17]. Além disso, a distribuição do campo dentro de um sistema biológico, nomeadamente, no corpo humano, é afetada pela distância e localização da fonte em relação ao corpo, a anatomia, a postura e o ambiente circundante [IARC13, Staebler17].

Existem dois mecanismos de acoplamento entre a radiação EM e qualquer um organismo vivo, nomeadamente, indireto e direto. Os mecanismos indiretos envolvem interações com um objeto que tem diferente potencial elétrico em relação ao corpo humano. Os mecanismos indiretos não são estudados neste trabalho.

Os mecanismos diretos resultam da interação direta entre os campos EM variáveis no tempo e um organismo exposto, podendo ser subdivididos em três tipos [ICNIRP98, ICNIRP09, ICNIRP10]:

- Acoplamento a campos elétricos de baixa frequência;
- Acoplamento a campos magnéticos de baixa frequência;
- Absorção de energia dos campos EM.

#### ***Acoplamento a campos elétricos de baixa frequência***

A interação dos campos elétricos de baixa frequência com o corpo humano resulta na indução da corrente elétrica no corpo. A distribuição da corrente induzida no corpo depende do tamanho, da forma e do posicionamento do corpo relativamente ao campo. Além disso, a exposição a um campo elétrico de baixa frequência resulta em polarização, i.e., na formação de novos dipolos elétricos, e na reorientação de dipolos elétricos já presentes nos tecidos [ICNIRP98, ICNIRP09]. Para um determinado campo elétrico externo, os campos mais fortes são induzidos quando o corpo humano está eletricamente aterrado, i.e., está em perfeito contato com o solo através dos pés. Os campos mais fracos são induzidos quando o corpo humano está isolado do solo [ICNIRP10]. A magnitude relativa destes efeitos depende das propriedades elétricas do corpo, nomeadamente, a condutividade e a permitividade. A condutividade define o fluxo de corrente e a permitividade é a responsável pelos efeitos de polarização. Estes parâmetros elétricos variam consoante a frequência aplicada e o tipo de tecido biológico [ICNIRP98].

O tamanho e a postura do corpo têm influência nos campos e correntes induzidas. Na Figura 3.4 são apresentadas as densidades de corrente presentes num corpo em

contacto com terra, sujeito a um campo elétrico vertical uniforme com valor de 10 kV/m e um valor de frequência de 60 Hz [Staebler17].

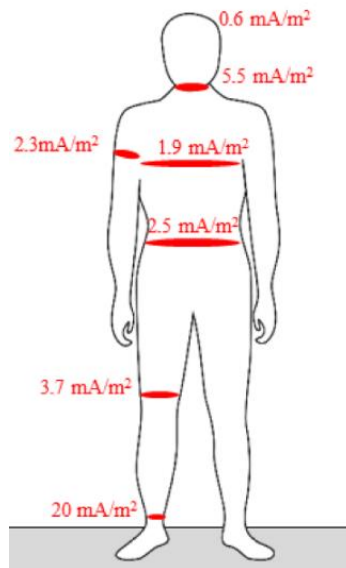


Figura 3.4 – Corpo exposto a um campo elétrico vertical uniforme de 10 kV/m a 60 Hz.

As correntes induzidas e os campos elétricos são mais significativos quando o corpo está sujeito a um campo vertical. As correntes induzidas e os campos elétricos dependem principalmente do tamanho, forma e posição do corpo [Staebler17].

### ***Acoplamento a campos magnéticos de baixa frequência***

A presença de um corpo num campo magnético não o perturba, ao contrário dos campos elétricos [Stozharov07, Staebler17]. A interação física dos campos magnéticos de baixa frequência com o corpo humano resulta em campos e correntes elétricas induzidos. As magnitudes do campo elétrico induzido e da densidade de corrente são proporcionais à taxa de variação e magnitude da densidade de fluxo magnético. As magnitudes do campo elétrico induzido e da densidade de corrente também dependem da condutividade elétrica dos tecidos e ainda do comprimento da malha onde é induzida essa corrente [ICNIRP98].

Na Figura 3.5 são apresentadas as malhas de circulação das correntes induzidas num corpo humano por um campo magnético de baixa frequência com orientação de fluxo magnético perpendicular ao plano frontal [Staebler17].

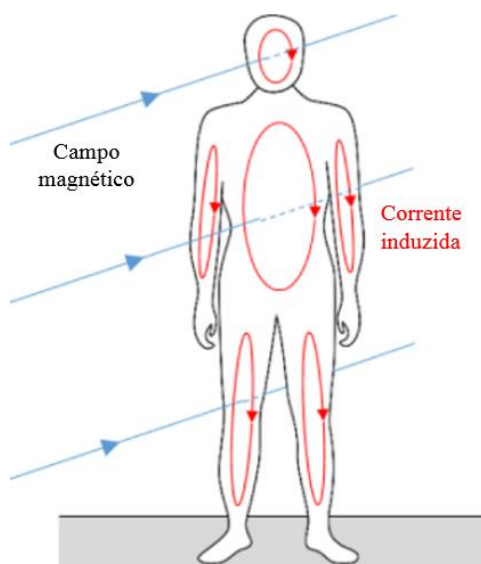


Figura 3.5 – Correntes induzidas num corpo humano por um campo magnético.

Na Figura 3.5, as correntes induzidas são distribuídas de forma não homogênea, dependendo da condutividade elétrica dos tecidos. Para frequências de valores acima de 10 MHz os valores das correntes induzidas não são relevantes, devido ao facto que os processos de absorção de energia assumem o controlo [Staebler17].

### ***Absorção de energia dos campos eletromagnéticos***

A exposição a campos elétricos e magnéticos de baixa frequência normalmente resulta na absorção de valores insignificantes de energia, sem aumento mensurável de temperatura no corpo. No entanto, a exposição a campos EM de frequências de valores acima de 100 kHz leva a uma absorção significativa de energia [IARC13, Staebler17]. Esta absorção de energia é manifestada por um aquecimento dos tecidos, i.e., efeitos térmicos, tomando valores significativos para frequências de valores entre 100 kHz e 300 GHz. A absorção de energia de campos EM produz o maior impacto na saúde humana [IARC13, Staebler17]. A exposição a um campo EM uniforme resulta numa deposição e distribuição de energia não-uniforme

dentro do corpo, que deve ser avaliada por medições e cálculos dosimétricos [ICNIRP98, IARC13, Staebler17].

Assim, os processos fisiológicos resultantes da exposição do corpo a campos EM estão relacionados com a indução das correntes em tecidos biológicos. Os valores das correntes induzidas são proporcionais aos diferentes valores de condutividade elétrica, dependendo do tipo de tecido. Na zona das baixas e médias frequências, i.e., valores  $1 \text{ Hz} < f < 10 \text{ MHz}$ , as correntes induzidas podem resultar em eletroestimulação dos recetores sensoriais da pele, da retina, dos tecidos nervosos e dos tecidos musculares [SCENIHR15, Staebler17]. A partir do valor de 100 kHz, a energia absorvida resulta no aquecimento local do tecido biológico. Os processos fisiológicos decorrentes da exposição a campos EM às diferentes frequências são apresentados na Figura 3.6.

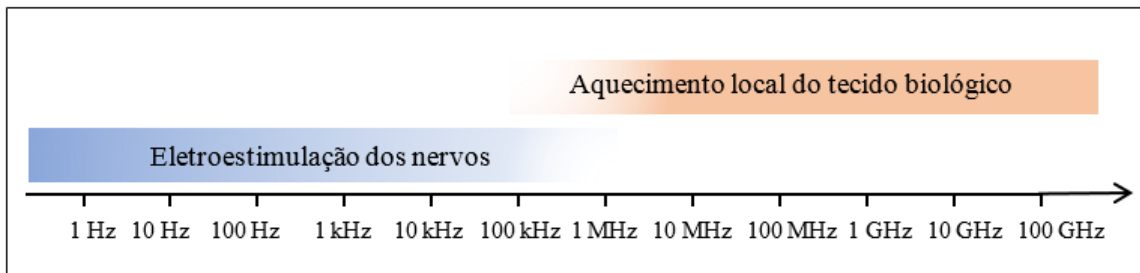


Figura 3.6 – Processos fisiológicos resultantes da exposição a campos EM.

A absorção de energia por um meio, por exemplo, por tecido biológico, é definida como a taxa específica de absorção SAR e é utilizada para avaliar a exposição humana a campos EM. A SAR representa a taxa a que a energia EM é absorvida por uma unidade de massa de tecido, é medida por W/kg sendo dada por:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (3.7)$$

sendo SAR a taxa específica de absorção,  $\sigma$  a condutividade elétrica do tecido,  $E$  o valor eficaz do campo elétrico interno,  $\rho$  a massa volumétrica. Existe a SAR local, nomeadamente, para cabeça, tronco e membros do corpo, e a SAR total de um corpo obtida por média aritmética dos valores das SAR calculados para todos os pontos do corpo.



A exposição a campos EM tem um efeito cumulativo, aumentando com o tempo de exposição e com o valor da dose [IARC13, Rifai14]. Mesmo os campos elétricos e magnéticos fracos, no caso de exposição prolongada, podem produzir efeitos potencialmente nefastos para a saúde, nomeadamente, processos degenerativos no sistema nervoso central, leucemia, câncer no cérebro, distúrbios hormonais [Stozharov07, IARC13, Staebler17]. Assim, são requeridas mais investigações sobre o efeito cumulativo dos campos EM a longo prazo na saúde humana.

### **3.3.2 Regime regulatório de sistemas de TESC**

Ultimamente em todas as organizações internacionais e regionais relacionadas com os sistemas de TESC, está em desenvolvimento uma quantidade considerável de trabalho no que respeita ao campo próximo e à CEM [ITU17]. Contudo, o regime regulatório de sistemas de TESC, em geral, é bastante complexo devido ao facto que os regulamentos e normas são fornecidos por várias organizações mencionadas acima com a natureza interdisciplinar. Assim, o grande número de organizações envolvidas, as interações entre as mesmas e o estado desigual de investigação e desenvolvimento em diferentes partes do mundo aumentam ainda mais a complexidade do quadro de normas para os sistemas de TESC [Kalialakis14, Kalialakis16]. Devido a esses fatores no quadro de normas para os sistemas de TESC ainda existem lacunas no que se refere aos limites de exposição a campos EM produzidos pelos mesmos e às distâncias de medição.

Contudo, é importante sublinhar que a normalização de sistemas, equipamentos, componentes de TESC é relativamente nova [Shoki14, Kalialakis16], estando abrangida pela norma CISPR 11 [CISPR15]. Os sistemas de TESC podem ser considerados como equipamentos do Grupo 2, nomeadamente, o equipamento que utiliza a banda das aplicações industriais, científicas e médicas (*Industrial, Scientific and Medical radio bands*, ISM). No equipamento do Grupo 2 a energia de RF na gama de frequências de valor entre 9 kHz e 400 GHz é intencionalmente

gerada e utilizada para transferência de energia EM. Por sua vez, conforme definição da CISPR 11, o Grupo 1 contém todos os equipamentos abrangidos pela presente norma que não sejam classificados como equipamentos do Grupo 2. O CISPR 11 contém limites para equipamentos do Grupo 2, dependendo da localização pretendida (Classe A: industrial ou Classe B: residencial). No entanto, o CISPR 11 ainda não especifica completamente limites de radiação para todas as bandas de frequências. Assim, os limites de segurança na exposição à radiação EM para a gama de frequências entre 9 kHz a 150 kHz não são especificados no CISPR 11.

Ultimamente estão em desenvolvimento sistemas de TESC trabalhando a frequências abaixo do valor de 150 kHz, nomeadamente, na gama de frequências de valor entre 20 kHz e 150 kHz para carregamento de baterias de VE [Li15b, ITU17]. Recentemente no CISPR foi criado um grupo de trabalho denominado CISPR/B para elaborar recomendações de CEM aplicadas aos sistemas de TESC que trabalham na gama de frequências de valor entre 9 kHz e 150 kHz. Desde 2014, quando o grupo foi criado, decorreram várias reuniões, e o primeiro resultado do seu trabalho devia sair em 2017 [ETSI16]. Nas outras entidades normalizadoras, nomeadamente, IEC, ISO, SAE também foram criados grupos de trabalho destinados à elaboração de normas para os equipamentos de TESC. As respetivas normas deviam ser publicadas ao longo do ano de 2017 [ETSI16], mas o prazo foi estendido até o final de 2018.

Atualmente, o desenvolvimento e a regulamentação de testes de segurança de sistemas de TESC para a exposição humana estão em um estado inicial, pelo que ainda não existem protocolos de avaliação prontamente aplicáveis disponíveis [ITU17]. Deve ser destacada a dificuldade na obtenção de normas uma vez que os *drafts* de normas e regulamentos já publicados pelas organizações reguladoras aplicáveis aos sistemas de TESC não são acessíveis para os investigadores devido ao seu elevado custo de aquisição, não havendo disponibilidade de verbas para o efeito. As lacunas na regulamentação de sistemas de TESC apresentam desafios

adicionais. Assim, por um lado os pesquisadores devem conhecer as normas e regulamentos que possam ser aplicados aos sistemas de TESC, tais como os limites de exposição a campos EM, por exemplo, taxas de absorção específicas no corpo humano, e acompanhar o desenvolvimento de novas regulamentações. Por outro lado, as organizações envolvidas na regulamentação de sistemas de TESC devem ser informados sobre os esforços de pesquisa neste campo [Kalialakis16].

As normas de segurança para exposição humana a campos EM são emitidas por organismos internacionais, como a ICNIRP e o IEEE. As restrições básicas são elaboradas pelas estas organizações para evitar a estimulação nervosa para frequências de valor até 5 MHz [IEEE05] ou de valor até 10 MHz [ICNIRP98], [ICNIRP10] e aquecimento excessivo de tecidos para frequências de valor entre 100 kHz e vários GHz. Muitos equipamentos de TESC operam em frequências de valor entre 20 kHz e 10 MHz, incluindo os casos de estudo apresentados neste trabalho, portanto, ambos os conjuntos de restrições básicas são aplicáveis. Contudo, no que diz respeito as recomendações para a exposição a campos EM em geral, como a norma são globalmente reconhecidas as recomendações da ICNIRP de 1998 [ICNIRP98], atualizadas em 2010 para frequências até 100 kHz [ICNIRP10]. As recomendações para a exposição a campos EM desenvolvidas pelo IEEE [IEEE05] também se aplicam ao nível internacional e nacional. Porém, é necessário sublinhar que mesmo a ICNIRP e não o IEEE é geralmente referenciado nas legislações nacionais [Kalialakis16]. Assim, neste trabalho para avaliação de exposição a campos EM irradiados pelo sistema de TESC foram adotadas as recomendações da ICNIRP [ICNIRP98, ICNIRP2010].

### **3.3.3 Limites de segurança na exposição à radiação EM**

Os limites de segurança na exposição à radiação EM estão baseados em estudos e emanados pelas organizações internacionais e europeias. Estes limites são adotados pelos países e o seu cumprimento é fiscalizado pelas autoridades competentes de cada país. O estabelecimento de limites de segurança é

fundamentado na procura dos valores mínimos de campos internos e externos ao tecido biológico, a partir dos quais começam a surgir efeitos biológicos adversos para a saúde. Como os limites de segurança na exposição à radiação EM estão definidos as *restrições básicas* e os *níveis de referência*, os quais convém distinguir.

As *restrições básicas* são os limites de exposição a campos EM definidos pelas organizações internacionais e europeias e baseados nos efeitos sobre a saúde já estabelecidos, i.e., as restrições básicas são quantidades físicas *dentro do corpo* na faixa de 1 Hz – 6 GHz. A proteção contra os efeitos adversos estabelecidos para a saúde exige que essas restrições básicas não sejam excedidas [ICNIRP98, ICNIRP10]. Dependendo da frequência, as quantidades físicas utilizadas para especificar as restrições básicas são a densidade de corrente no corpo humano  $J$ , taxa de absorção específica SAR, a absorção específica (*Specific Absorption, SA*) e a densidade de potência  $S$ . Na Figura 3.7 são apresentadas as grandezas consideradas em restrições básicas dentro do corpo em função da frequência [Staebler17].

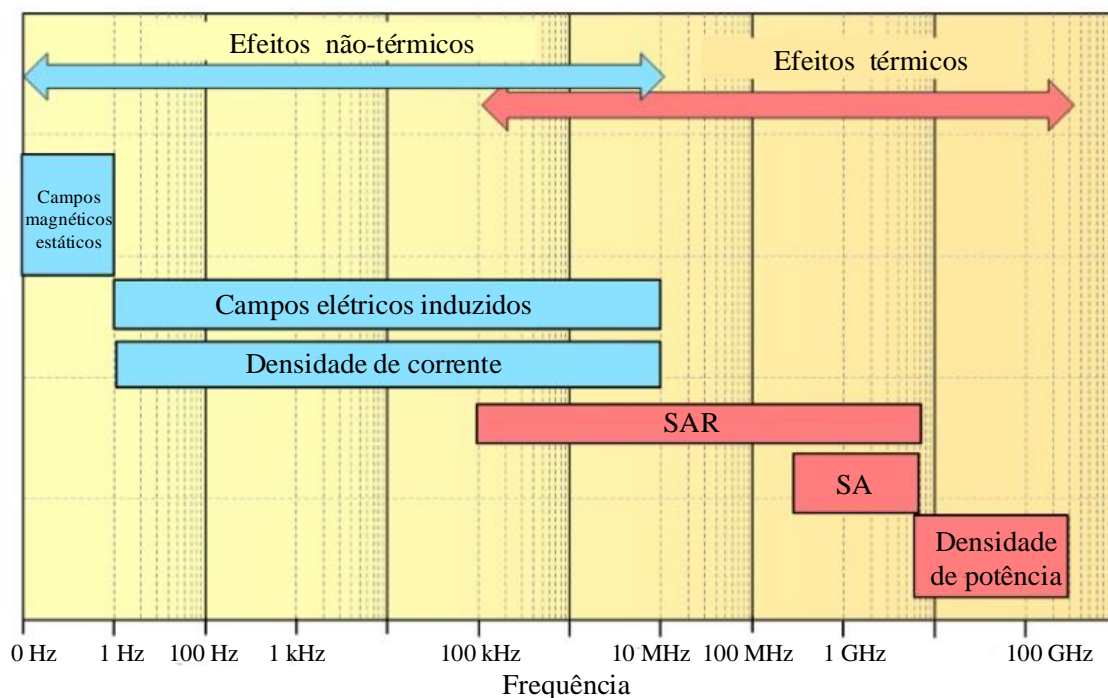


Figura 3.7 – Especificação das restrições básicas dentro do corpo.

Uma vez que a radiação EM penetra no corpo, as restrições básicas devem ser medidas no seu interior, o que, no caso do SAR ou da densidade de corrente no corpo  $J$ , é difícil de realizar na prática. Pelo que, para realizar a avaliação prática da exposição, a partir das restrições básicas são estabelecidos os *níveis de referência* para algumas grandezas EM, chamados também as exposições máximas admissíveis conforme definição de IEEE [IEEE05].

Os níveis de referência são as *quantidades físicas externas* estabelecidas com o objetivo de avaliar na prática os níveis de exposição do corpo aos campos externos.

As grandezas físicas externas para avaliação dos níveis de exposição são a densidade de potência  $S$ , intensidades de campos elétrico  $E$  e magnético  $H$  e densidade do fluxo magnético  $B$ .

Na Tabela 3.2 são apresentadas os principais efeitos biológicos e os limites de exposição correspondentes de acordo com a frequência [Staebler17].

Tabela 3.2 – Efeitos biológicos e limites de exposição em função da frequência

Frequência	Principais efeitos biológicos	Restrições básicas	Níveis de referência
<1 Hz	Vertigem, náusea	Campo magnético estático, B (T)	-
1 Hz – 10 MHz	Estimulação sensorial Estimulação do nervo Estimulação muscular	Campo Elétrico interno, E (V/m)  Densidade de corrente, J (A/m <sup>2</sup> )	Campo Elétrico, E (V/m) Indução magnética, B (μT) Densidade de corrente, J (A/m <sup>2</sup> )
100 kHz – 6 GHz	Aquecimento de tecidos biológicos	SAR (W/kg)	Campo Elétrico, E (V/m) Indução magnética, B (μT) Campo magnético H (A/m) Densidade de potência S (W/m <sup>2</sup> )
300 MHz – 6 GHz	Percepção auditiva	SA (J/kg)	-
100 kHz – 110 MHz	Aquecimento de tecidos biológicos	SAR (W/kg)	Corrente de contacto, I <sub>c</sub> (A) Corrente induzida, I <sub>i</sub> (A)
6 GHz – 300 GHz	Aquecimento superficial	Densidade de potência, S (W/m <sup>2</sup> )	Densidade de potência, S (W/m <sup>2</sup> )

É necessário sublinhar que o cumprimento dos níveis de referência garante o cumprimento das restrições básicas. O facto de o valor medido de uma grandeza física externa ultrapassar o nível de referência não implica necessariamente a exposição excessiva [ANACOM07, Staebler17]. No entanto, nessas circunstâncias, é necessário verificar se as restrições básicas são cumpridas.

### **3.3.4 Níveis de referência da exposição à radiação EM**

Os níveis de referência da exposição à radiação EM servem para serem comparados com os valores das grandezas medidas no exterior do organismo. Os níveis de referência são calculados pelas organizações competentes mencionadas em cima e são fundamentados nos dados publicados e nos modelos teóricos e computacionais. O cumprimento de todos os níveis de referência fixados garante o cumprimento das restrições básicas [ICNIRP98].

A maioria dos países tem normas distintas para o público ocupacional, i.e., trabalhadores, e para a exposição do público em geral [ICNIRP98, IEEE05, ICNIRP10]. Os trabalhadores são considerados adultos saudáveis, conscientes dos riscos e expostos apenas durante o horário de trabalho. Enquanto que o público em geral representa uma diversidade de sensibilidade à saúde e está potencialmente exposto 24 horas por dia, sendo inconsciente dos riscos. Para o público em geral os limites de exposição são mais rigorosos [ICNIRP98]. De acordo com o ICNIRP para a gama de frequências entre 3 kHz e 1 MHz, os limites de exposição para o público em geral são um sétimo daqueles aplicados ao público ocupacional [ICNIRP98]. As recomendações da ICNIRP foram utilizadas na Recomendação 1999/519/EC [EC99] publicada pela Comissão Europeia com o objetivo de proteger o público em geral e os trabalhadores, respetivamente. Os níveis de referência da ICNIRP para a exposição ocupacional e pública em geral [ICNIRP98] ao campo elétrico são apresentados na Figura 3.8.

As recomendações para a exposição a campos EM publicadas pela ICNIRP foram adotadas na maioria dos países da Europa Ocidental e em alguns países

industrializados fora da Europa, nomeadamente, em Austrália. Alguns países da Europa de Leste, como a Rússia, a Polónia e a Bulgária, adotaram limites mais estritos da ordem de 2% da ICNIRP [Kosatsky13].

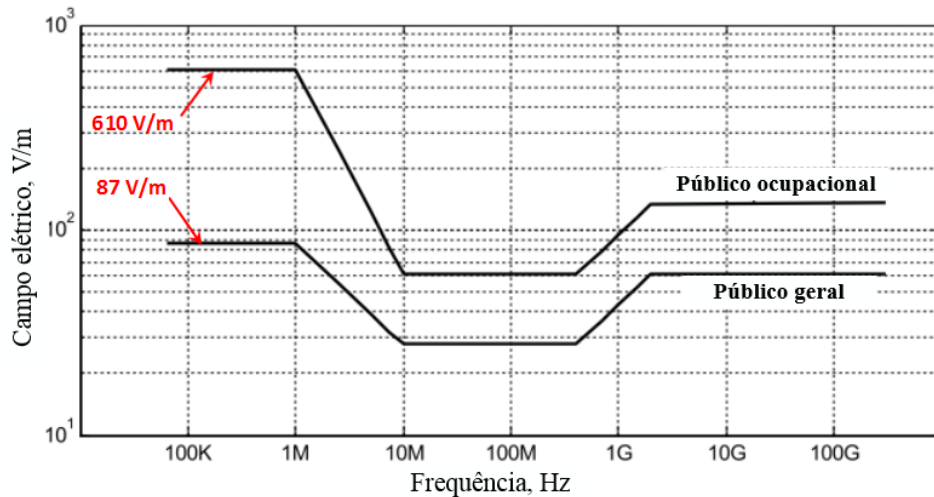


Figura 3.8 – Níveis de referência para a exposição ocupacional e do público em geral [ICNIRP98]

Os limites de segurança desenvolvidas por ICNIRP e IEEE são geralmente semelhantes, com algumas exceções [IEEE05]. Em geral, os limites de exposição recomendados pela ICNIRP são mais restritivos do que os limites recomendados pelo IEEE. Por essa razão, os níveis de referência de exposição a campos EM adotados neste trabalho seguem às recomendações da ICNIRP para público em geral. Os níveis de referência da ICNIRP e da IEEE para a exposição pública em geral [ICNIRP10, IEEE05] são apresentados na Figura 3.9.

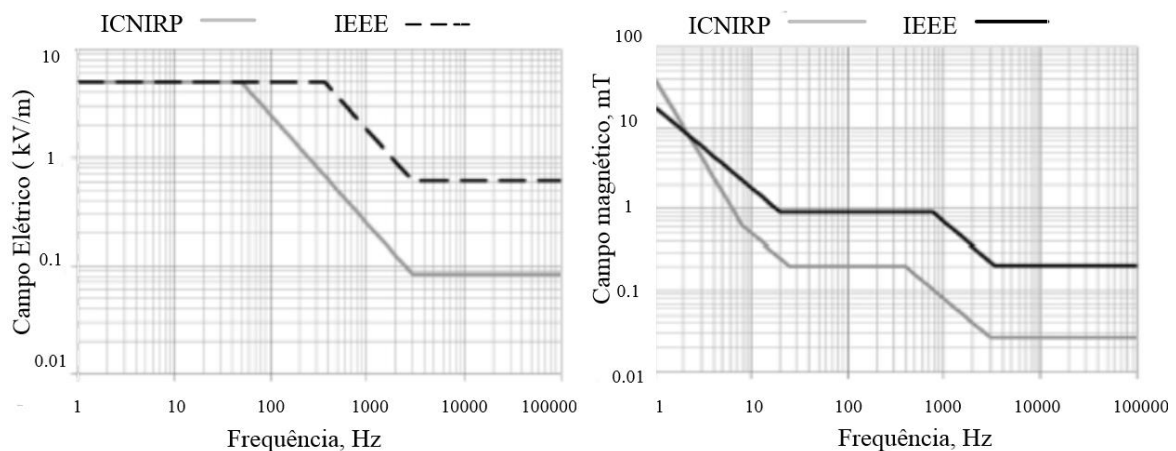


Figura 3.9 – Níveis de referência da ICNIRP e do IEEE para público em geral.

Na tabela 3.3 são apresentados os níveis de referência para a exposição do público em geral a campos elétricos e magnéticos que variam no tempo recomendados pela ICNIRP e atualizadas em 2010 [ICNIRP10]. Os níveis de referência de grandezas EM para as frequências aplicadas no Caso de Estudo\_1 e Caso de Estudo\_2 são assinalados a vermelho.

Em versão mais recente das recomendações de ICNIRP [ICNIRP10] para campos elétricos e magnéticos na gama de frequências entre 1 Hz e 100 kHz são definidos os níveis de referência menos restritivos do que na versão de 1998 [ICNIRP98], i.e., 83 V/m para o campo elétrico  $E$ , 21 A/m para o campo magnético  $H$  e 27  $\mu\text{T}$  para a densidade do campo magnético  $B$  contra os valores recomendados em [ICNIRP98], i.e., 87 V/m, 5 A/m e 6.25  $\mu\text{T}$ , respetivamente.

Tabela 3.3 – Níveis de referência para a exposição do público em geral [ICNIRP98]

Frequência	Valor eficaz			
	Campo Elétrico $E$	Campo magnético $H$	Densidade do fluxo magnético $B$	Densidade de potência $S$
Hz	V/m	A/m	$\mu\text{T}$	$\text{W/m}^2$
até 1 Hz	-	$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	
1-8 Hz	10000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25 Hz	10000	$4000/f$	$5000/f$	-
0.025-0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0.8-3 kHz	$250/f$	5	6.25	-
3-150 kHz	87	5	6.25	-
0.15-1 MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	-
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	-
10-400 MHz	28	0.073	0.092	2
400-2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 \times f^{1/2}$	$0.0046 \times f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0.16	0.20	10

Nota:  $f$  é frequência em Hz.



Os níveis de referência da ICNIRP para a exposição ao campo elétrico do público ocupacional e do público em geral [ICNIRP10] são apresentados na Figura 3.10.

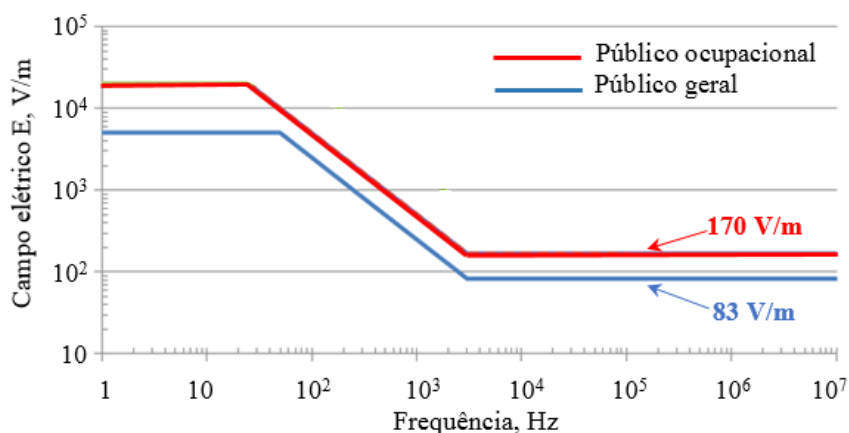


Figura 3.10 – Níveis de referência para a exposição ocupacional e do público em geral [ICNIRP10].

Os níveis de referência para a exposição do público em geral a campos elétricos e magnéticos para frequências entre 0 Hz e 100 kHz recomendados em [ICNIRP10] são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Níveis de referência para a exposição do público em geral [ICNIRP10]

Frequência	Campo Elétrico E, kV/m	Campo magnético H, A/m	Densidade do fluxo magnético B, T
1 Hz – -8 Hz	5	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz – 25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 Hz – 50 Hz	5	$1.6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
50 Hz – 400 Hz	$2.5 \times 10^2/f$	$1.6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
400 Hz – 3 kHz	$2.5 \times 10^2/f$	$6.4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz – 10 MHz	$8.3 \times 10^{-2}$	21	$2.7 \times 10^{-5}$

Os níveis de referência de grandezas EM para as frequências aplicadas no Caso de Estudo\_1 e Caso de Estudo\_2 são assinalados a vermelho.

***Exposição a fontes com múltiplas frequências***

De acordo com as recomendações de ICNIRP [ICNIRP09, ICNIRP10] em situações de exposição simultânea a campos EM de frequências diferentes, essas exposições são aditivas em seus efeitos. Portanto, em caso de exposição simultânea a campos de frequências diferentes, deve ser aplicado o critério chamado coeficiente de exposição [ICNIRP10] dado por:

$$\sum_{j=1Hz}^{10MHz} E_j / E_{R,j} \leq 1 \quad (3.8)$$

sendo  $E_j$  a intensidade do campo elétrico à frequência  $j$ ,  $E_{R,j}$  o nível de referência da intensidade do campo elétrico recomendado em [ICNIRP10].

É importante referir em caso de existência de humanos ou animais na zona circundante do VE durante o carregamento de bateria existe o risco de exposição dos mesmos à uma forte radiação EM. Assim, tendo em conta esta possibilidade, as medições no Caso de Estudo\_1 e Caso de Estudo\_2 (Capítulo 5) foram realizadas à distância entre 4 cm e 40 cm do equipamento testado. No entanto, conforme as normas definidas pelas organizações internacionais e europeias aplicáveis aos sistemas de TESC, as medições de campos elétricos e magnéticos devem ser realizadas às distâncias de 3 m, 10 m ou 30 m do equipamento testado [ICNIRP98, IEEE05, ICNIRP10, CISPR 15, ETSI15, ETSI16]. Pela esta razão, as distâncias referenciadas nas normas deveriam ser corrigidas e redefinidas pelas organizações competentes, sendo esta uma recomendação deste trabalho.

**3.4 Impacto do Campo EM sobre o Canal de Dados**

Nos sistemas de TESC baseados no acoplamento indutivo ressonante, as principais fontes emissoras dos campos EM são as bobinas Tx e Rx [Kong15]. As emissões EM irradiadas pelos sistemas de TESC não devem exceder os níveis de referência definidos pelas normas internacionais e europeias, de forma a evitar a interferência no funcionamento normal de outros equipamentos. No caso de TESC combinada com o canal de TDSF, podem surgir problemas de CEM [Obayashi14, Kong15].

### 3.4.1 Efeito sobre o canal dos dados

O objetivo principal do sistema de TESC é transmitir energia. No entanto, é importante transferir a energia simultaneamente com a transmissão de dados. A TDSF desempenha um papel importante no carregamento de baterias de equipamentos eletrônicos portáteis, de equipamentos de elevados valores de potência e dos VEs, pois o rendimento do carregamento depende significativamente das comunicações [Li15b].

Em [Fornazier12, Welsh02, Batista12a, Batista12b, Batista13, TI14] são apresentados os parâmetros de desempenho da rede de transmissão de dados, sendo caracterizados por:

- Velocidade de transmissão de dados ou taxa de transmissão de dados, i.e., os *bits* transmitidos por unidade de tempo, i.e., b/s;
- Latência, i.e., o tempo que decorre entre a transmissão de uma mensagem e a receção da mesma;
- Tempo de resposta, i.e., tempo de reação, determina o intervalo do tempo entre o envio do pedido da mensagem até uma resposta ao pedido da mensagem.

Estes parâmetros influenciam o processo de transmissão de dados.

No Capítulo 2 é mencionado que a transmissão de dados nas frequências mais elevadas da ordem dos GHz permite incrementar a velocidade de transferência de informação. Assim, para troca de dados entre o Tx e o Rx nos sistemas de TDSF, poderiam ser adotados protocolos de comunicação, nomeadamente, o Bluetooth, Near Field Communication, ZigBee [Li15b].

Para avaliar o impacto das emissões EM irradiadas pelo sistema de TESC sobre o canal de transmissão de dados é necessário definir um protocolo de comunicação entre o Tx e Rx.

### **3.4.2 Seleção do protocolo de transmissão de dados**

A fim de definir a solução adequada para a transmissão de dados no canal de comunicação, devem ser comparados vários protocolos de comunicação.

A seleção do protocolo de comunicação a utilizar deve ser baseada numa análise abrangente de vários parâmetros, entre os quais o mais importante é o tempo de estabelecimento da ligação [Fornazier12, Batista14, Pothuganti14, TI14]. As emissões EM irradiadas pelo sistema de TESC sobre o canal durante a TDSF podem resultar numa perda de dados ou numa velocidade de transmissão de dados lenta. Assim, a imunidade às emissões EM é também importante para o protocolo de transmissão de dados a operar num ambiente eletromagneticamente poluído [Green12].

De forma a generalizar o canal de comunicação nos sistemas de TESC, é de todo o interesse utilizar um protocolo fiável e suportado pelos fabricantes de equipamentos. Assim, um dos fatores importantes para a escolha do protocolo de TDSF adotado para este trabalho é o alto nível de padronização e interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes [Nolte05].

Tendo em conta estas considerações e com intuito de escolher uma solução adequada para a transmissão de dados num sistema de TESC com uma frequência suficientemente diferente da frequência de transferência de energia, previamente foi feita uma comparação dos três protocolos de TDSF de curto alcance na área da comunicação, nomeadamente, Bluetooth, Wi-Fi e ZigBee.

#### ***Bluetooth***

O Bluetooth é um protocolo robusto de alto nível de segurança conhecido como o IEEE 802.15.1. O Bluetooth é projetado para curto alcance, baixo consumo e dispositivos baratos, com o principal objetivo de substituir os cabos dos dispositivos eletrónicos [Oliveira17].

As redes Bluetooth são um tipo de rede de área pessoal sem fios (*Wireless Personal Area Network*, WPAN) e operam na banda de frequências dos 2.4 GHz, i.e., na faixa ISM. Para combater as emissões EM irradiadas e a colisão entre Wi-Fi, ZigBee ou outras comunicações sem fios que usam a mesma frequência de 2.4 GHz, é utilizada uma técnica de espalhamento espectral por saltos em frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum*, FHSS) [Fornazier12, TI14, Oliveira17]. A banda de frequências utilizada por Bluetooth é dividida em 79 canais separados por 1 MHz entre as frequências das portadoras.

As versões mais antigas do Bluetooth, focadas em incrementar a taxa de transferência de dados, são caracterizadas pelo consumo elevado de energia. Atualmente o Bluetooth está em transição para a versão da próxima geração, nomeadamente, a versão 3.0 que apresenta a maior taxa de transferência (até 24 Mb/s) e versões 4.0, 4.1, 4.2 que apresentam função *Bluetooth Low Energy*, BLE, o que reduz significativamente o consumo de energia. [Tamura13].

### ***ZigBee***

O protocolo ZigBee foi concebido para redes de controlo e sensores e é destinado ao desenvolvimento de aplicações de baixa velocidade de transmissão de dados e baixo consumo energético. O ZigBee utiliza os canais especificados pela norma IEEE 802.15.4, sendo que os canais de 0 a 10 estão definidos para a utilização da banda ISM de valor de 868 MHz, disponível na Europa, e de valor de 900 MHz, disponível nos Estados Unidos, enquanto os canais de 11 a 26 utilizam a banda de 2.4 GHz, disponível globalmente [Oliveira17]. Na banda de valor de 2.4 GHz os canais têm um espaçamento de 5 MHz entre eles e disponibilizam uma taxa de transmissão de valor de 250 kb/s. Este protocolo é caracterizado pelo baixo custo, alta segurança e fiabilidade [TI14, Batista17, Oliveira17].

O protocolo ZigBee está associado a um tipo de modulação *Direct Sequence Spread Spectrum* técnica (DSSS), que consiste na substituição de cada bit de informação por uma sequência de bits combinada entre o Tx e o Rx. A sequência

de bits conhecida como código *chip* protege a comunicação contra as emissões EM irradiadas [TI14].

### ***Wi-Fi***

A rede sem fio IEEE 802.11 também é conhecida como rede Wi-Fi. O Wi-Fi é o nome comum usado para as diferentes versões do protocolo IEEE 802.11 (a/b/g/n/i, etc.), que descreve os protocolos para redes locais sem fios, WLAN.

O protocolo Wi-Fi IEEE 802.11 pode ser configurado para operar na banda de frequência de 2.4 GHz ou de 5 GHz. Este protocolo fornece conectividade sem fios segura e fiável [Fornazier12, Pothuganti14]. Atualmente, a versão IEEE 802.11ac prevê taxas de comunicação até 1300 Mb/s [Tamura13].

### ***Comparação entre os protocolos de TDSF***

A comparação entre os protocolos de TDSF [Welsh02, Woodings06, Fornazier12, TI14, Oliveira17] é apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Comparação entre os protocolos de TDSF

Caraterísticas	Protocolos de TDSF		
	Bluetooth 802.15.1	ZigBee 802.15.4	Wi-Fi 802.11
Área de aplicação	Substituição de cabos	Controlo, Monitorização	Web, Email, Multimédia
Frequência de operação	2.4 GHz	868 MHz; 915 MHz; 2.4 GHz	2.4 / 5 GHz
Alcance máximo, m	100 m (classe 1)	10 -100 m	100 m
Taxa de transferência	1 Mb/s	20 – 250 Kb/s	150 – 600 Mb/s
Consumo	1 – 100 mW	1 – 2 mW	325 mW
Custo da unidade terminal	Baixo	Muito baixo	Alto
Propriedades principais	Velocidade, custo, conveniência	Fiável, baixo consumo, custo, eficácia	Velocidade, flexibilidade

Conforme Tabela 3.5 o protocolo *Wi-Fi* IEEE 802.11 proporciona uma velocidade de transmissão de dados mais elevada, mas tem um consumo energia elétrica

elevado e um alto custo da unidade terminal, enquanto que o *ZigBee* apresenta um menor consumo de energia e menor custo da unidade terminal, mas apresenta uma menor taxa de transferência de dados. O Bluetooth fornece relativamente baixa velocidade da rede em comparação com o *Wi-Fi* IEEE 802.11, mas proporciona baixo consumo e um custo da unidade terminal reduzido. É necessário sublinhar que a taxa de transferência de dados é importante, mas não é crucial para o carregamento de baterias de múltiplos VEs sem contacto, uma vez que o Tx e o Rx iriam trocar de dados por pequenos pacotes em vez de enormes blocos de dados.

Uma das grandes vantagens dos protocolos Bluetooth e Wi-Fi é a sua versatilidade, a compatibilidade entre os dispositivos de diferentes fabricantes e grande variedade de módulos para diferentes tarefas [Welsh02].

O protocolo Bluetooth é um compromisso em termos de velocidade de transferência de dados/eficiência/custo. O Bluetooth tende a aproximar os seus parâmetros aos outros dois protocolos.

De acordo com [Green12], em geral, há cinco potenciais redes sem fios que estão a ser consideradas para aplicações intra e inter-veículos, nomeadamente, Bluetooth, UWB, RFID, ZigBee e Wi-Fi. No entanto, apenas o Bluetooth foi implementado por vários construtores de veículos automóveis nos últimos anos, sendo atualmente um protocolo amplamente utilizado [Nolte05, Woodings06, TI14]. ZigBee, UWB e Wi-Fi ainda não foram implementados em todos os veículos, estando em desenvolvimento estudos neste campo [Nolte05].

O ZigBee vem preencher uma lacuna não coberta pelos outros protocolos, nomeadamente, a interligação de sensores sem fios para o controlo. É esperado que o ZigBee possa ser utilizado em aplicações de monitorização e controlo, relacionadas com a temperatura e medição de humidade, bem como de aquecimento, ventilação, ar condicionado e controlo de iluminação [Nolte05].

Tendo em conta estas considerações e o facto de o protocolo Bluetooth ser amplamente utilizado na indústria automóvel [Nolte05, Green12], foi decidido que

esta solução é a preferível e a mais indicada para transferência de dados no canal de comunicação do sistema de TESC.

### **3.4.3 Sensibilidade do canal de transmissão de dados**

Em [IEEE05-802.15.1, Bluetooth16] são considerados aspetos sobre a influência das interferências nos sistemas de comunicação, nomeadamente, para o protocolo Bluetooth. São definidos valores de emissões espúrias provenientes dos outros equipamentos que operam na mesma faixa de frequências. No entanto, para interferências na gama das frequências de operação dos sistemas de TESC, i.e., entre 20 kHz e 150 kHz, os valores numéricos não são fornecidos nas normas. Contudo, em [IEEE05-802.15.1, Bluetooth16] é definido que o desempenho do canal de comunicação exposto às emissões provenientes dos outros equipamentos que operam fora da banda de frequência do canal de comunicação deve satisfazer a condição quando a taxa de bits errados  $BER \leq 0.1\%$ . Sendo assim, foi definido que o principal objetivo na avaliação do efeito das emissões EM produzidas pelo sistema de TESC sobre o canal de dados será a avaliação experimental da ocorrência de erros na transmissão de dados durante o funcionamento normal do sistema de TESC.

## **3.5 Conclusões**

O impacto das emissões irradiadas pelo sistema de TESC quer sobre os seres vivos quer sobre o canal de comunicação ou outros equipamentos elétricos e eletrónicos e é uma preocupação crescente, devido ao incremento contínuo da distância de transferência e do valor da energia transmitida sem contacto.

Embora o regulamento de CEM e o procedimento dos ensaios laboratoriais que possam ser aplicados á transferência de energia sem contacto tenham sido estabelecidos, estes devem ser atualizados para responder aos novos requerimentos para os sistemas de TESC. Existem lacunas na regulamentação e elaboração de normas, padrões e limites para os equipamentos de TESC para garantir a proteção



do corpo humano, de dispositivos eletrónicos e do canal de comunicação do campo EM produzido.

# 4

---

## Modelação e Implementação do Protótipo

*Neste capítulo são apresentados os aspetos fundamentais associados a modelação e desenho do sistema de transferência de energia sem contacto. É descrito o sistema de TESC que opera nos valores de frequência da ordem dos kHz. São apresentados os aspetos associados a modelação de protótipos para o Caso de Estudo\_1 e para o Caso de Estudo\_2. Ainda, neste capítulo são apresentados o desenvolvimento do protótipo experimental de TESC e a implementação do sistema de transmissão de dados sem fios entre o Tx e o Rx. Ainda, é apresentado o desenvolvimento da aplicação computacional que permite a sintonização da frequência funcionamento do protótipo para o regime de ressonância.*

## 4.1 Introdução

O fundamento de um sistema TESC por acoplamento indutivo ressonante está baseado no princípio de funcionamento do transformador sem núcleo ferromagnético (*Air core transformer*) [Romba19] com fraco coeficiente de acoplamento. O sistema de TESC por acoplamento indutivo ressonante está constituído pelos circuitos Tx e Rx, respetivamente, sendo a energia elétrica transferida do circuito Tx para o circuito Rx utilizando o campo magnético. Para a transferência de energia os circuitos Tx e Rx são sintonizados para a mesma frequência de ressonância utilizando condensadores de compensação.

Os condensadores de compensação podem ser ligados em paralelo (P) ou em série (S) com as bobinas dos circuitos Tx e Rx. A compensação com o condensador em série com as bobinas é apresentada na Figura 4.1 e é utilizada no Caso de Estudo\_1, no Cado de Estudo\_2 e na implementação do protótipo experimental. No Capítulo 4 e no Capítulo 5 os dígitos 1 e 2 subscritos para as resistências, bobinas e condensadores correspondem ao lado dos circuitos Tx e Rx, respetivamente.

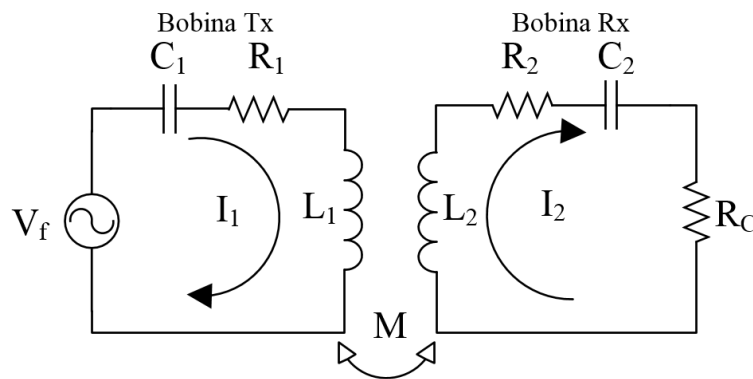


Figura 4.1 – Esquema do sistema de TESC.

A compensação em série na Figura 4.1 vai apresentar a característica da fonte de corrente, enquanto que a compensação em paralelo vai apresentar a característica da fonte de tensão. Os condensadores de compensação podem ainda ser conectados às bobinas dos circuitos Tx e Rx mediante as seguintes topologias: Série-Série (SS), Série-Paralelo, Paralelo-Série e Paralelo-Paralelo. Neste trabalho é utilizada

a topologia SS. De acordo com [Chopra12, Li15a, Neves11, Nguyen15, Vilathgamuwa15] a utilização da topologia SS nos sistemas de TESC para carregamento de baterias é mais vantajosa, devido a que a bateria sendo uma típica fonte de tensão precisa de ser carregada com fonte de corrente. A topologia SS representa exatamente o comportamento da fonte de corrente. Mais ainda, a frequência de ressonância na topologia SS teoricamente depende menos de carga e do coeficiente de acoplamento  $k$  do que nas outras topologias [Chopra12, Li15a, Neves11, Nguyen15, Vilathgamuwa15].

No que se refere à frequência de ressonância, esta é fundamental num sistema de TESC por acoplamento indutivo. A sintonização dos circuitos Tx e Rx para a mesma frequência de ressonância permite aumentar o rendimento do sistema e obter a máxima transferência de energia [Brusamarello13, Ozdemir17].

A modelação eletromagnética do sistema de TESC é realizada recorrendo ao método dos elementos finitos sendo apresentada uma introdução ao FEM no Anexo 1. A modelação eletromagnética é apresentada no Anexo 2.

## 4.2 Modelação Elétrica

No esquema apresentado na Figura 4.1 as auto-indutâncias  $L_1$  e  $L_2$  dos circuitos Tx e Rx, respetivamente, estão acopladas por uma indutância mútua  $M$ . A resistência equivalente  $R_1$  representa as perdas resistivas da bobina Tx e as perdas resistivas internas da fonte  $V_f$ , enquanto que a resistência  $R_2$  representa as perdas resistivas da bobina Rx. Para compensar a reatância das duas bobinas  $L_1$  e  $L_2$  e para assegurar que somente a energia ativa seja transmitida para a carga, os condensadores  $C_1$  e  $C_2$  são introduzidos em série com as bobinas Tx e Rx, respetivamente. A resistência  $R_C$  representa a carga.

A tensão induzida no circuito Rx é dada por:

$$V_2 = j\omega MI_1 \quad (4.1)$$

No circuito Tx é induzida uma força eletromotriz devido ao campo magnético variável criado pela corrente induzida no circuito Rx originando uma tensão dada por:

$$V_1 = j\omega MI_2 \quad (4.2)$$

O circuito elétrico simplificado usado para modelação de um sistema de TESC é apresentado na Figura 4.2.

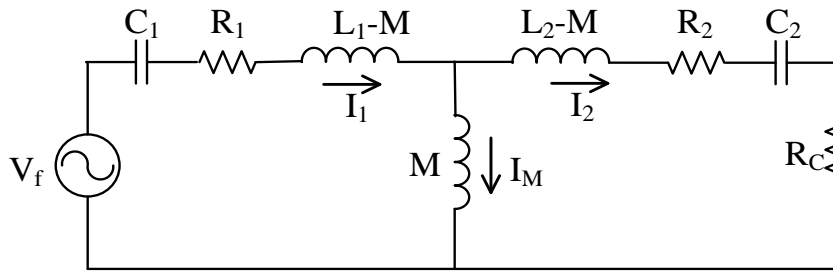


Figura 4.2 – Circuito equivalente do sistema de TESC.

O valor de indutância mútua  $M$  depende das características físicas e dimensões da estrutura de acoplamento magnético, nomeadamente, de existência do núcleo ferromagnético, do número de espiras dos enrolamentos, da distância e do desalinhamento entre as bobinas Tx e Rx.

Os sistemas de TESC estudados neste trabalho são caracterizados pelo reduzido valor de  $M$  em comparação com indutâncias próprias das bobinas Tx e Rx devido às elevadas distâncias e aos desalinhamentos entre as bobinas. Sendo assim, os sistemas de TESC do Caso\_de\_Estudo\_1 e do Caso\_de\_Estudo\_2 podem ser definidos como os sistemas com acoplamento fraco.

Para o circuito equivalente do sistema de TESC apresentado na Figura 4.2, cada um circuito Tx e Rx devido aos seus parâmetros idênticos tem a mesma frequência de ressonância  $\omega_0$  é dada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (4.3)$$

Considerando:

$$V_f = \left( R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) I_1 - j\omega M I_2 \quad (4.4)$$

$$\left( R_c + R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) I_2 - j\omega M I_1 = 0 \quad (4.5)$$

$$I_M = I_1 - I_2 \quad (4.6)$$

as correntes do lado Tx e Rx são dadas por:

$$I_1 = \frac{Z_2 V_f}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{12}^2} \quad (4.7)$$

$$I_2 = \frac{j\omega M V_f}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{12}^2} \quad (4.8)$$

Nas condições de ressonância a parte reativa da impedância dos circuitos Tx e Rx é nula. Assim, para a frequência de ressonância as correntes nos circuitos Tx e Rx são dadas por:

$$I_1 = \frac{R_2' V_f}{R_1' R_2' + \omega^2 M^2} \quad (4.9)$$

$$I_2 = \frac{j\omega M V_f}{R_1' R_2' + \omega^2 M^2} \quad (4.10)$$

onde  $R_1'$  e  $R_2'$  são as resistências totais dos circuitos Tx e Rx, respetivamente, e são dadas por:

$$R_1' = R_1 \quad (4.11)$$

$$R_2' = R_2 + R_c \quad (4.12)$$

A potência aos terminais do lado de Tx,  $P_{in}$ , e a potência aos terminais da carga,  $P_{out}$ , são dadas por:

$$P_{in} = V_f I_1 \cos \varphi \quad (4.13)$$

$$P_{out} = R_c I_2^2 = \frac{R_c \omega^2 M^2 V_f^2}{(R_1' R_2' + \omega^2 M^2)^2} \quad (4.14)$$

Considerando (4.11) e (4.12) o rendimento da transferência de energia é dado por:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{R_c \omega^2 M^2}{R_2' (R_1' R_2' + \omega^2 M^2) \cos \varphi} \quad (4.15)$$

Considerando (4.17), o rendimento da transferência da energia é função da

frequência de operação e dos parâmetros do circuito. O rendimento diminui rapidamente com o incremento da distância da operação de ressonância. O alto fator de qualidade das bobinas Tx e Rx é de importância crucial para a eficiência do sistema de TESC que opera na frequência de ressonância.

### 4.3 Desenho do sistema de TESC

O sistema de TESC para carregamento de bateria estudado no Caso de Estudo\_1 e no Caso de Estudo\_2 é apresentado na Figura 4.3 [Baikova19]. O sistema consiste do bloco de estação de carregamento e do bloco do VE. A fonte de tensão supostamente é a fonte de 230 V de CA monofásica. Depois de retificação e filtragem esta tensão é aplicada a um inversor que funciona em regime de alta frequência de comutação. Para a TESC é utilizado um conjunto de dois circuitos ressonantes com uma bobina Tx e uma bobina Rx. A tensão de saída do inversor é aplicada ao circuito LC do Tx. No bloco de VE o circuito LC do Rx, que recebe a energia elétrica por acoplamento indutivo ressonante, é ligado a um retificador para poder carregar a bateria na saída.

O estudo do controlo do sistema de TESC não é do âmbito desta tese.

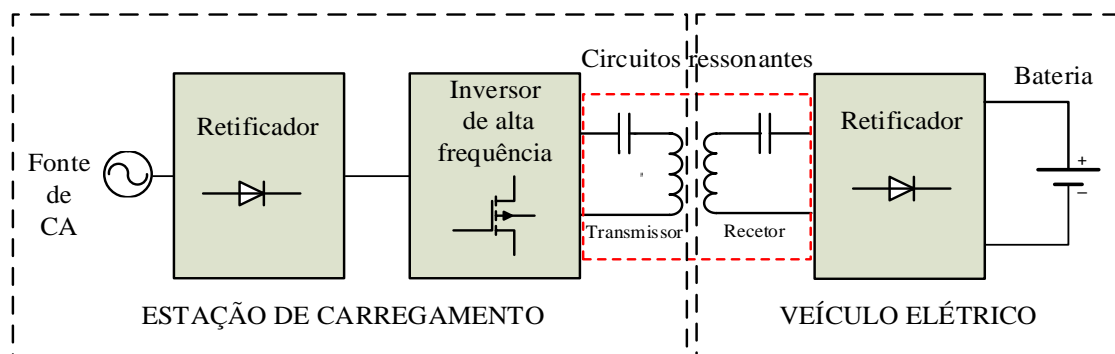


Figura 4.3 – Diagrama do sistema de TESC.

Na Figura 4.4 é apresentado o esquema detalhado dos blocos do sistema de TESC utilizado no Caso de Estudo\_1 e no Caso de Estudo\_2. As emissões do campo elétrico do Caso de Estudo\_1 e do Caso de Estudo\_2 serão analisadas no

Capítulo 5. No esquema elétrico do sistema de TESC apresentado na Figura 4.4 é utilizado o inversor de potência em ponte completa constituído por quatro transístores MOSFET do tipo FREDFET funcionando como interruptores com díodos de recuperação rápida.

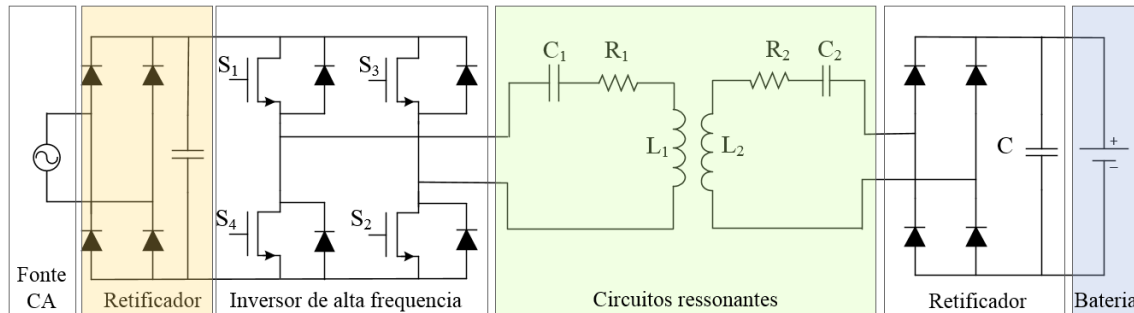


Figura 4.4 –Esquema elétrico do sistema de TESC.

A operação do inversor consiste em fechar os pares de interruptores S1/S2 e S3/S4 alternadamente resultando aos seus terminais de saída uma onda de tensão quadrada. A onda de tensão quadrada aos terminais à saída do inversor é apresentada na Figura 4.5. A operação pode ser realizada a uma frequência de comutação abaixo ou acima da frequência de ressonância dos circuitos Tx e Rx. No entanto é desejável operar ligeiramente acima da frequência de ressonância de modo a reduzir as perdas de comutação [Valtchev09].

De acordo com a análise de Fourier, uma onda periódica de qualquer forma pode ser tratada como a soma de ondas sinusoidais de frequências diferentes, isto é, da frequência fundamental e dos múltiplos da frequência fundamental. O espectro de uma tensão de onda quadrada que alimenta o circuito ressonante do Tx contém a harmónica fundamental bem como as harmónicas ímpares e pode ser representada matematicamente através da série de Fourier dada por:

$$v_1(t) = D \times V_{dc} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_{dc}}{n\pi} \sin(2\pi n f_s t) \quad (4.1)$$

sendo  $D$  o ciclo de trabalho (*duty cycle*) que perfaz 0.5 ou 50% para uma onda quadrada,  $V_{dc}$  a tensão na entrada do inversor,  $n$  o número da harmónica em análise,



$f_s$  a frequência de comutação,  $t$  o tempo,  $T_{ciclo}$  a duração total do ciclo,  $t_{imp}$  a duração do impulso.

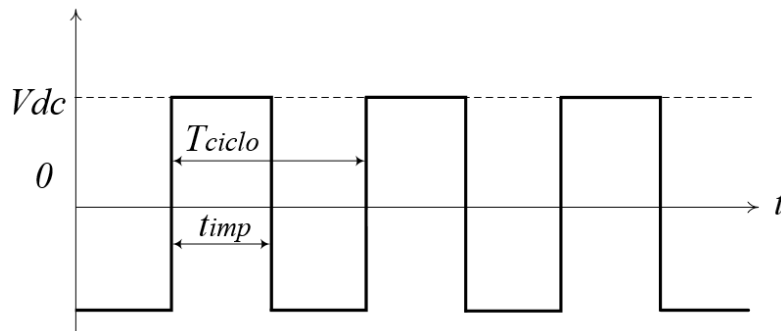


Figura 4.5 – Forma de onda de tensão na entrada do circuito de Tx.

Do lado Rx é utilizado o retificador sendo a tensão é filtrada pelo condensador  $C_f$ .

## 4.4 Modelação para Casos de Estudo 1 e 2

### 4.4.1 Caso de Estudo\_1

#### *Modelo em 2D*

O protótipo de TESC utilizado no Caso de Estudo\_1 está instalado no Laboratório de Eletrónica de Potência da Universidade Técnica de Sófia em Bulgária. A frequência de operação do protótipo tem o valor de  $f_o = 142$  kHz. O esquema elétrico e o esquema equivalente do protótipo de TESC utilizado no Caso de Estudo\_1 são apresentados na Figura 4.1 e na Figura 4.2, respetivamente. A configuração do protótipo: Tx e Rx, é apresentada na Figura 4.6 [Baikova17a].



Figura 4.6 – Configuração do protótipo: Caso de Estudo\_1.

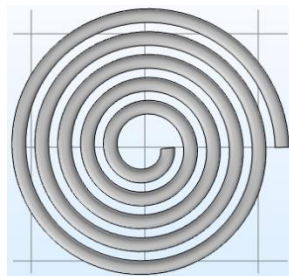
O protótipo do sistema de TESC é constituído por um núcleo maciço de ferrite EE6527, sendo as bobinas Tx e Rx realizadas em tubo de cobre com uma configuração espiral; o número de espiras de cada bobina é de 5.

Os parâmetros do circuito do sistema de TESC são apresentados na Tabela 4.1.

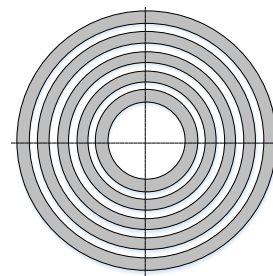
Tabela 4.1 – Parâmetros do sistema de TESC – Caso de Estudo\_1

Parâmetros	Designação	Valor
$L_1$	Auto-indutância de bobina Tx	64 $\mu$ H
$L_2$	Auto-indutância de bobina Rx	64 $\mu$ H
$N_1=N_2$	Número de espiras nas bobinas Tx/Rx	5
$C_1$	Capacitância do lado Tx	27 nF
$C_2$	Capacitância do lado Rx	27 nF
$R_C$	Resistência de carga	32 $\Omega$
$f_o$	Frequência de operação	142 kHz

A simulação é realizada para a distância entre as bobinas de 40 mm e de 80 mm [Baikova16d]. Para a simulação é considerada uma abordagem de simplificação na configuração das bobinas Tx e Rx que consiste na representação dum indutor espiral plano como um conjunto de fios circulares concêntricos. Esta abordagem é frequentemente usada na modelação de bobinas espirais [Ke14, Rueter16, Gendron17]. A configuração de bobina Tx/Rx do protótipo e o modelo simplificado são apresentados na Figura 4.7. O comprimento do fio condutor do modelo simplificado, apresentado na Figura 4.7 (b) é aproximadamente igual ao comprimento do indutor espiral da Figura 4.7 (a).



(a)



(b)

Figura 4.7 – (a) Bobina espiral plana do Tx e Rx; (b) Modelo simplificado.

Considerando que as bobinas e ferrites são axissimétricas, i.e., possui simetria de revolução, para a simulação foi utilizada a geometria 2D com simetria no eixo  $z$ . A geometria 2D com simetria no eixo  $z$  apresenta vantagens, pois através do modelo 2D é possível gerar um modelo 3D fazendo uma rotação no eixo  $z$  [COMSOL12]. Neste caso todas as propriedades físicas do modelo 2D são transpostas para o modelo 3D, o que permite simplificar os cálculos e reduzir o tempo de simulação.

As bobinas e o núcleo ferromagnético são considerados imersos no domínio do ar, a fronteira de qual limita o cálculo numérico de grandezas de interesse. A fronteira do domínio computacional, além da linha axial de simetria, é a semicircunferência que se encontra a uma distância considerável das fontes de campo, i.e., das espiras de bobinas Tx e Rx.

Na Figura 4.8 é apresentado o domínio de estudo de elementos finitos para o modelo 2D do Caso de Estudo\_1.

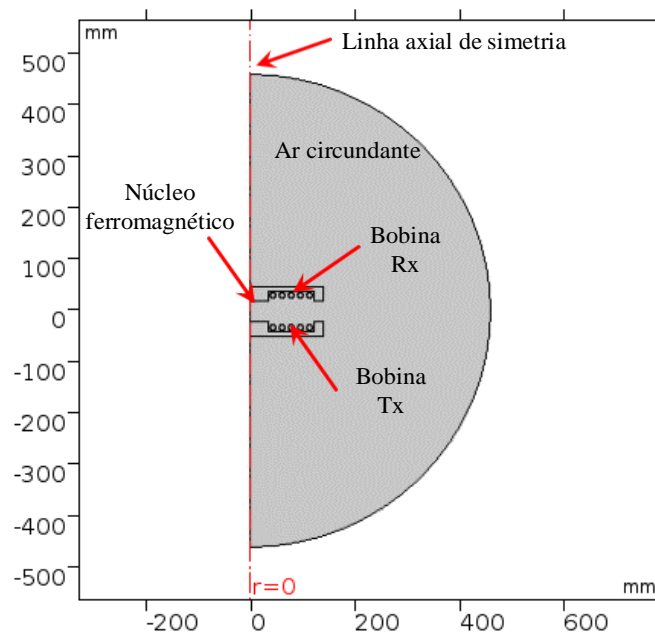


Figura 4.8 – Domínio de estudo para o modelo 2D: Caso de Estudo\_1.

O modelo em 3D gerado a partir de rotação do modelo em 2D no eixo  $z$  é apresentado na Figura 4.9.

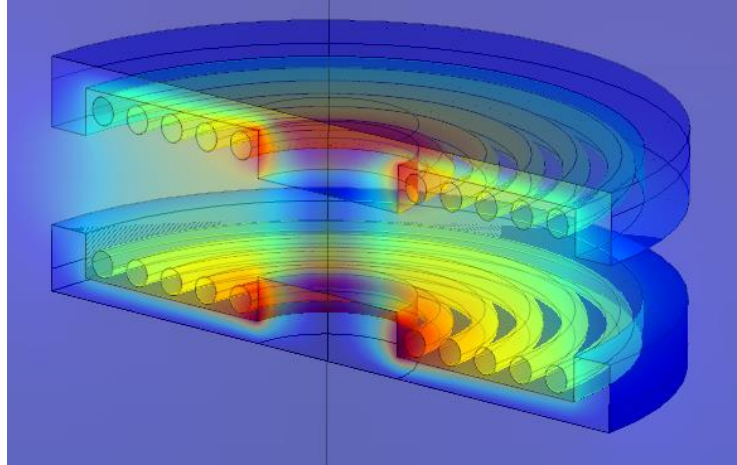


Figura 4.9 – Modelo em 3D: Caso de Estudo\_1.

As malhas obtidas para o modelo do Caso de Estudo\_1 são apresentadas na Figura 4.10. As malhas estão mais concentradas na região de espiras de bobinas e na região de núcleo ferromagnético, onde o campo é máximo e tem um elevado gradiente.

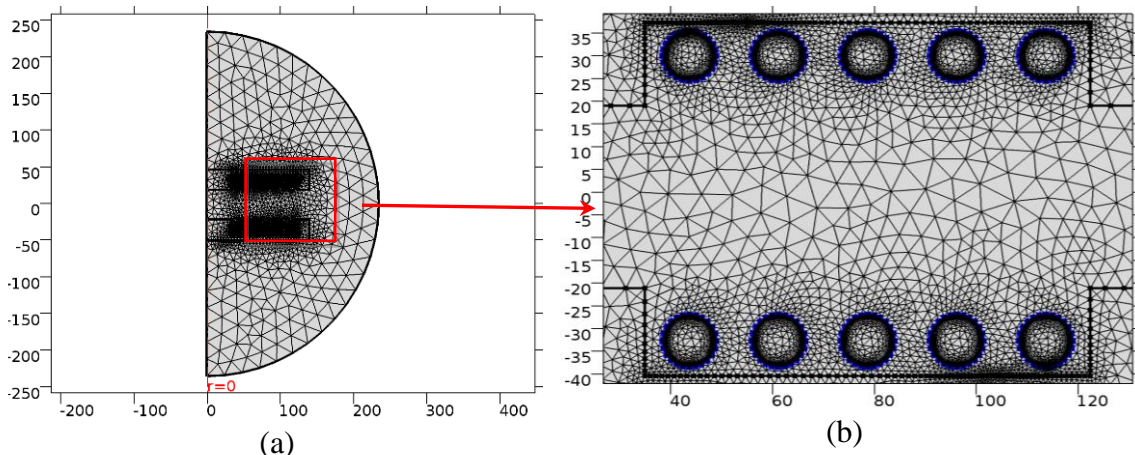


Figura 4.10 – (a) Malha dos elementos finitos do modelo;  
(b) Detalhe de malha na região de bobinas.

Na simulação, na fronteira do domínio do sistema é imposta a condição de Dirichlet, com potencial vetor magnético nulo em toda a fronteira, i.e.,  $\mathbf{A}=0$ . A condição de Neumann é imposta na linha de simetria onde a variação do potencial na direção perpendicular á fronteira é igual a zero, i.e.,  $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} = 0$ . Na Figura 4.11 são apresentadas as condições de fronteira impostas para Caso de Estudo\_1.

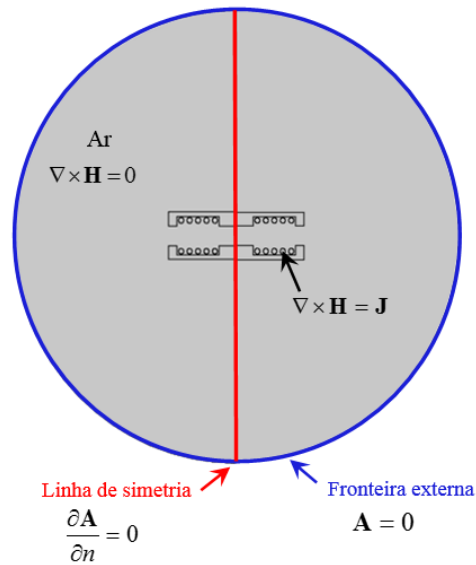


Figura 4.11 – Condições de fronteira para modelo 2 D: Caso de Estudo\_1.

Para simular a fonte de alimentação, os condensadores e a carga, foi considerada a interface física de Circuitos Elétricos (*Electric Circuit*) [COMSOL12], sendo as componentes adicionadas, conectadas por seus números de nó e simuladas como circuitos elétricos.

#### 4.4.2 Caso de Estudo\_2

O protótipo de TESC utilizado no Caso de Estudo\_2 está instalado no Laboratório de Eletrónica de Potência da FCT da Universidade Nova de Lisboa. A frequência de operação do protótipo tem o valor de  $f_o = 20$  kHz. O esquema elétrico e o esquema equivalente do protótipo de TESC utilizado no Caso de Estudo\_2 são apresentados na Figura 4.1 e na Figura 4.2, respetivamente. As configurações das bobinas Tx e Rx e do protótipo são apresentadas na Figura 4.12.

As bobinas deste sistema de TESC estão realizadas de maneira que as duas metades da mesma bobina estão enroladas em sentidos opostos, como é apresentado na Figura 4.12. Nesta configuração é forçada a existência de dois polos magnéticos que obrigam o campo a passar pela bobina Rx que tem exatamente a mesma forma, mas menos espiras (9:1) [Medeiros11].

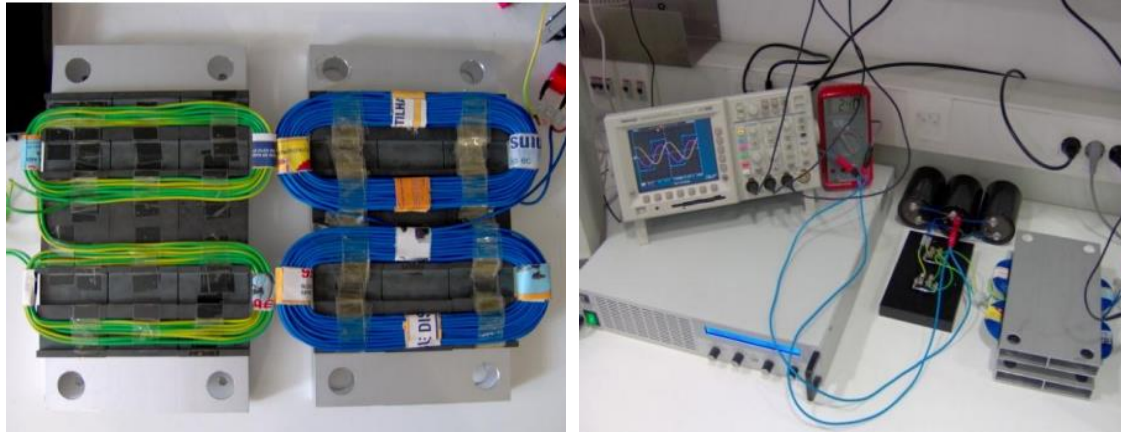


Figura 4.12 – Configuração das bobinas e do protótipo: Caso de Estudo\_2.

O núcleo ferromagnético do sistema é composto por duas placas de ferrite do tipo 3F4 e está colado à blindagem protetora. A blindagem protetora é constituída por dois perfis de alumínio, desempenhando a função de atenuar o campo EM disperso.

Na Figura 4.13 é apresentada a visão em 3D das bobinas Tx e Rx, com as setas indicadoras do sentido da corrente, e do núcleo ferromagnético com o perfil de alumínio [Medeiros11].

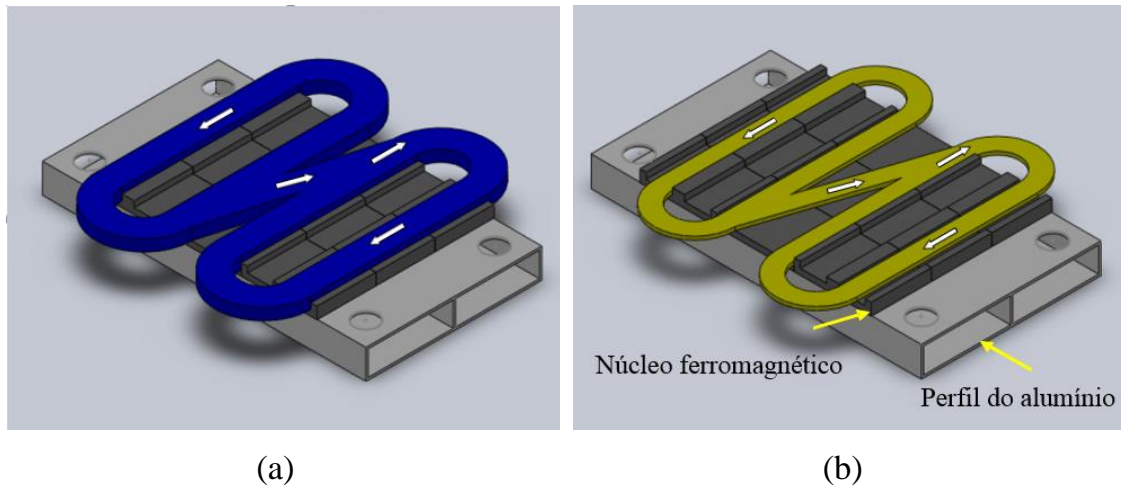


Figura 4.13 – Visão 3D de bobinas Tx (a) e Rx (b).

Os parâmetros do circuito do sistema de TESC são apresentados na Tabela 4.2.



Tabela 4.2 – Parâmetros do sistema de TESC – Caso de Estudo\_2

Parâmetros	Designação	Valor
$L_1$	Auto-indutância de bobina Tx	847 $\mu\text{H}$
$L_2$	Auto-indutância de bobina Rx	12 $\mu\text{H}$
$N_1/N_2$	Número de espiras nas bobinas Tx/Rx	36/4
$C_1$	Capacitância do lado Tx	100 nF
$C_2$	Capacitância do lado Rx	6.8 $\mu\text{F}$
$R_C$	Resistência de carga	10 $\Omega$
$f_o$	Frequência de operação	20 kHz

Para o Caso de Estudo\_2 foram feitas duas simulações, a primeira em 2D e a segunda em 3D.

### Modelo em 2D

Nesta simulação, as bobinas, o núcleo ferromagnético e o perfil de alumínio são considerados imersos no domínio de ar. O limite do domínio computacional tem a forma de um quadrado cujas fronteiras se encontram à uma distância considerável das fontes de campo, i.e., espiras de bobinas Tx e Rx. Na Figura 4.14 é apresentado o domínio de estudo de elementos finitos para o modelo 2D e uma visão detalhada da região de bobinas e núcleo ferromagnético do Caso de Estudo\_2.

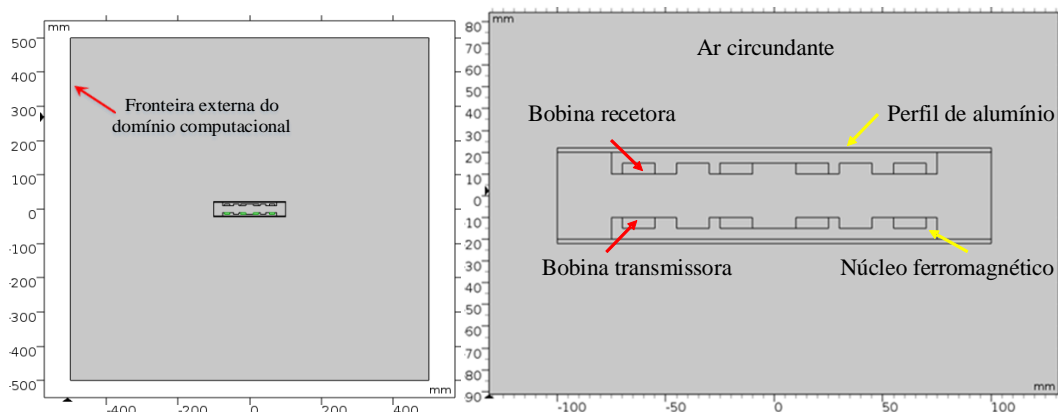
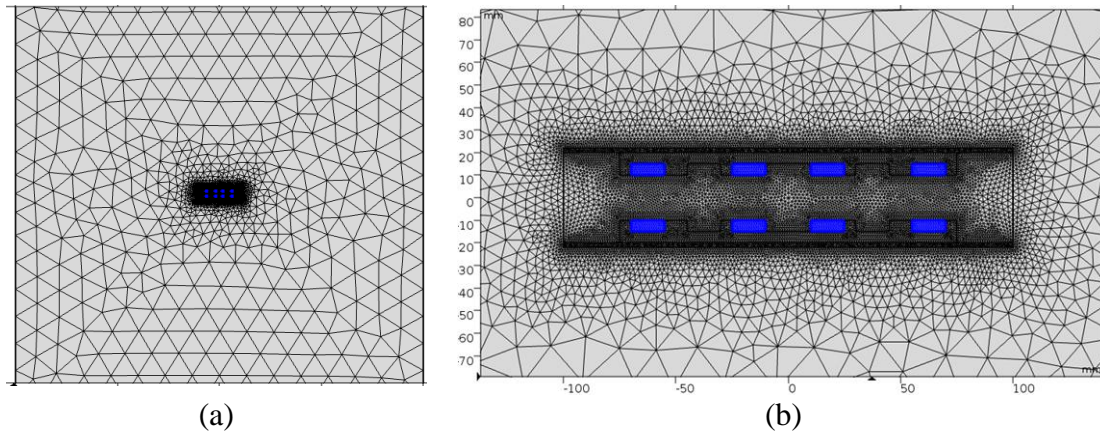


Figura 4.14 – Domínio de estudo para o modelo 2D do Caso de Estudo\_2.

As malhas obtidas pelo FEM para modelo do Caso de Estudo\_2 são apresentadas na Figura 4.15. Como era de esperar, as malhas estão mais concentradas na região de espiras de bobinas e na região de núcleo ferromagnético.



(a) Malha dos elementos finitos do modelo;  
(b) Detalhe de malha na região de bobinas.

Na fronteira do domínio do problema foi imposta a condição de Dirichlet, sendo o potencial vetor magnético nulo em toda a fronteira, i.e.,  $A=0$ . Na Figura 4.16 são apresentadas as condições de fronteira impostas para simulação 2D em Caso de Estudo\_2.

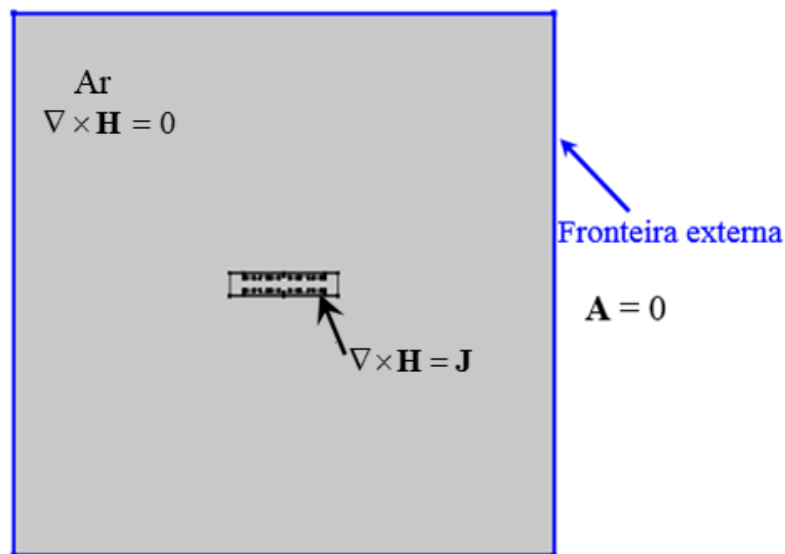


Figura 4.16 – Condições de fronteira para modelo 2 D: Caso de Estudo\_2.

A fonte de alimentação, os condensadores e a carga foram considerados na simulação recorrendo à interface física de Circuitos Elétricos (*Electric Circuit*) [COMSOL12], sendo as componentes adicionados, conectadas por seus números de nó e simuladas como circuitos elétricos.



### Modelo em 3D

Nesta simulação as bobinas, o núcleo ferromagnético e a blindagem protetora são considerados imersos no domínio de ar. Dada a simetria do modelo, todas as simulações foram efetuadas com base na partição de  $\frac{1}{4}$  do modelo de acordo com a Figura 4.17.

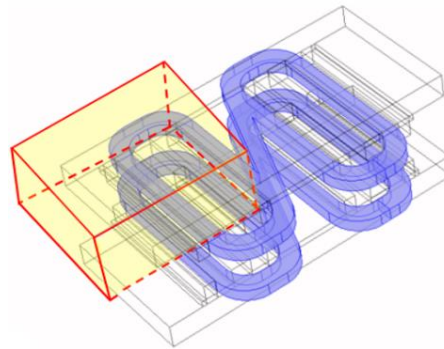


Figura 4.17 – Partição de  $\frac{1}{4}$  do modelo tomada para o estudo.

O modelo de bobinas com o núcleo ferromagnético e o escudo protetor usado para a simulação EM é apresentado na Figura 4.18.

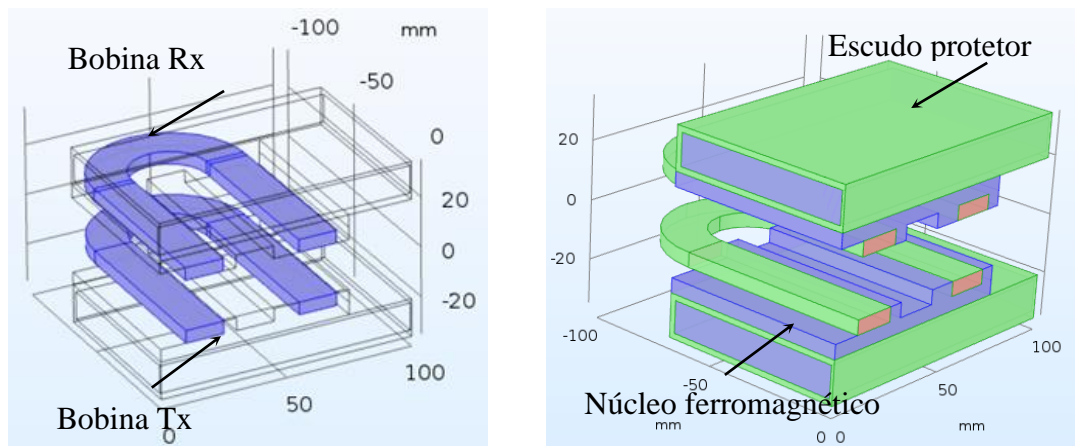


Figura 4.18 – Modelo 3D: Caso de Estudo\_2.

O domínio computacional para o modelo em 3D tem a forma de um cubo cujas fronteiras se encontram a uma distância considerável das fontes do campo EM, i.e., espiras de bobinas Tx e Rx. As malhas obtidas pelo Comsol para o modelo 3D do Caso de Estudo\_2 são apresentadas na Figura 4.19. As malhas são mais

concentradas na região das espiras das bobinas, do núcleo ferromagnético e do escudo protetor.

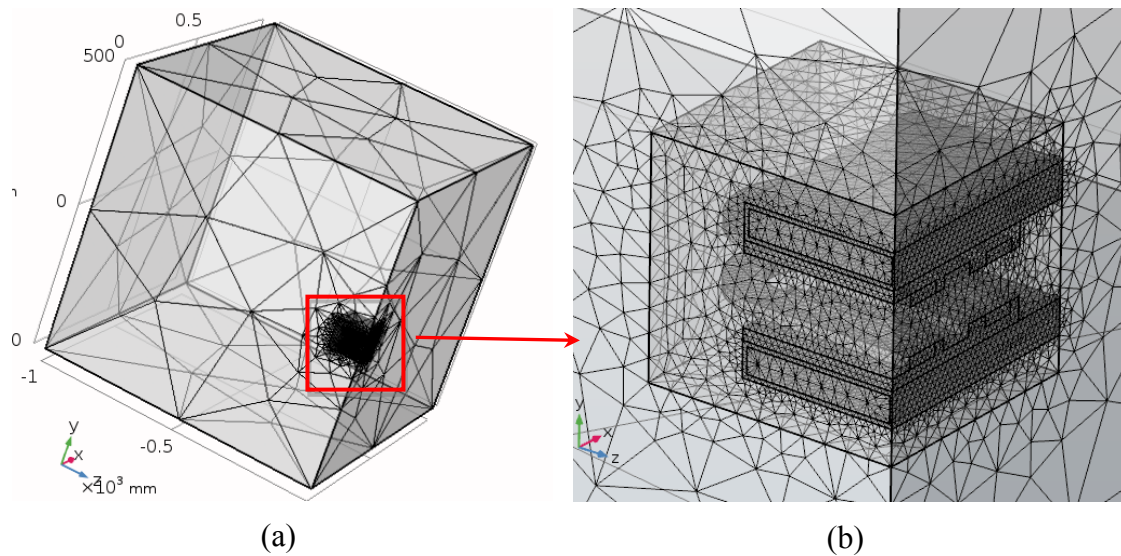


Figura 4.19 – (a) Malha dos elementos finitos do modelo;  
(b) Detalhe de malha na região de bobinas.

De forma similar ao caso de simulação em 2D, na fronteira do domínio do problema, i.e., nas superfícies do cubo, foi imposta a condição de Dirichlet, sendo o potencial vetor magnético nulo em toda a fronteira, i.e.,  $\mathbf{A}=0$ . A fonte de alimentação, os condensadores de ressonância e a carga foram considerados na simulação recorrendo à interface física de Circuitos Elétricos (*Electric Circuit*) [COMSOL12].

## 4.5 Implementação do Protótipo Experimental

Nesta secção é descrita a implementação do protótipo de um sistema de TESC. O protótipo tem a qualidade de sintonização da frequência de operação para o regime de ressonância mediante o desenvolvimento de uma aplicação computacional e a implementação do canal de comunicação. A aplicação computacional permite a compensação dos eventuais desalinhamentos e variação de distância entre o Tx e o Rx. O canal de comunicação entre o Tx e o Rx é implementado recorrendo ao uso de MCs.

Na fase da implementação do protótipo prevaleceu a utilização de dispositivos eletrónicos de baixo custo e baixo consumo da energia eléctrica sem descuidar a possibilidade de escalabilidade.

### *Topologia do protótipo experimental*

A topologia do protótipo experimental do sistema de TESC implementado é apresentada na Figura 4.20.

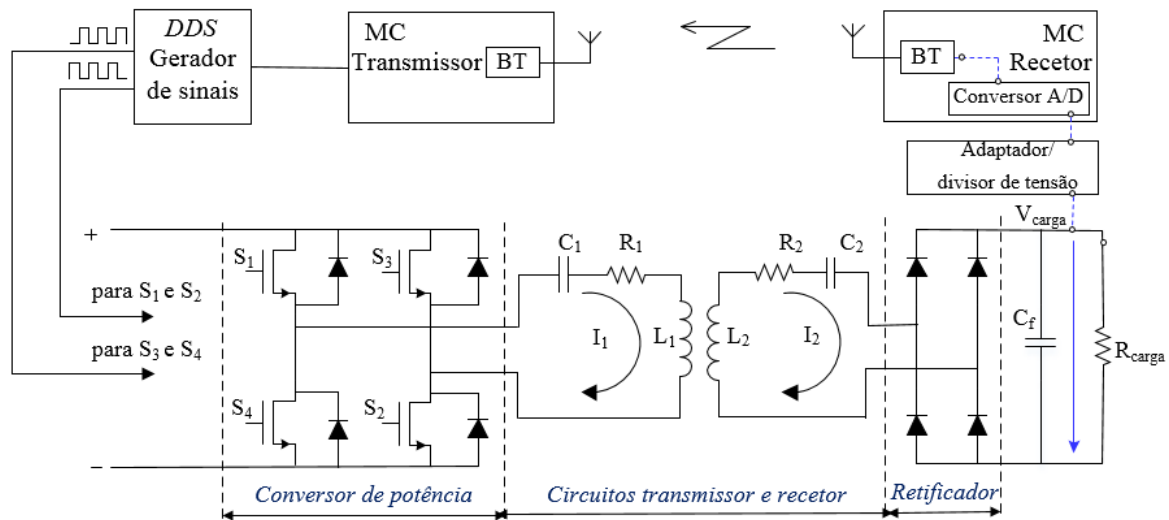


Figura 4.20 – Topologia do protótipo experimental implementado.

A topologia do protótipo apresentada na Figura 4.20 está constituída pelos seguintes módulos:

- canal de comunicação entre o Tx e Rx.
- gerador de sinais;
- acopladores óticos;
- conversor de potência;
- circuitos Tx e Rx;
- retificador;
- carga;
- adaptador/divisor de tensão.

Para facilitar a implementação do protótipo foram utilizados dispositivos prefabricados.

### ***Microcontroladores***

O núcleo do sistema são dois MCs que fazem parte do módulo canal de comunicação entre o Tx e Rx. Os MCs coordenam o funcionamento de circuitos Tx e Rx, respetivamente. Na implementação do protótipo foram utilizados dois MCs ESP32 (*Espressif Systems*), sendo dispositivos de baixo custo e baixo consumo da energia elétrica [Maier17] apresentados na Figura 4.7.



Figura 4.21 – Microcontrolador ESP32.

O ESP32 é um modelo recente *System on a Chip*, SOC, com o MC integrado e com os módulos Wi-Fi e Bluetooth 4.2 incorporados. Para a transmissão dos dados é usado o módulo Bluetooth (Figura 4.21). O módulo Bluetooth incorporado facilitou a implementação do protótipo experimental.

A Figura 4.20 inclui também o conversor análogo-digital (Conversor A/D). O Conversor A/D integrado no MC converte a fração de tensão aplicada aos terminais de carga para o formato digital. Esta fração é obtida a partir do Adaptador/Divisor de tensão cujo esquema é apresentado na Figura 4.24 (a).

### ***Sintetizador digital direto***

O módulo Sintetizador digital direto (DDS) AD9850 foi utilizado na implementação do protótipo com a função de gerador de sinais para a comutação

dos interruptores do módulo do conversor de potência. O DDS gera uma onda quadrada com frequência desejável até 1MHz. O DDS permite que a frequência, a fase e a amplitude da onda gerada à saída possam ser alteradas de forma precisa e rápida pelo MC do lado Tx. O DDS é um dispositivo de baixo custo, baixo consumo da energia elétrica, alta precisão da onda de saída e comutação rápida [Peng15]. No protótipo o DDS é coordenado pelo MC do circuito Tx, tendo como função de gerar dois sinais de onda quadrada com o desfasamento entre si de 180°. O DDS AD9850 é apresentado na Figura 4.22 (a).

### ***Acopladores óticos***

O módulo de acopladores óticos é apresentado na Figura 4.22 (b). O módulo de acopladores óticos é utilizado para garantir a separação galvânica entre o DDS e o conversor de potência e é composto por dois acopladores óticos 4N28. A função dos acopladores óticos é a de impedir que as sobretensões afetem os dispositivos mais sensíveis do sistema.

### ***Conversor de potência***

O módulo conversor de potência gera uma onda quadrada aos terminais do Tx. O modelo selecionado TS-H-12V 30A *Dual Channel H Bridge Motor Drive Module* tem incorporados dois canais independentes. Os principais critérios para seleção foram a elevada frequência de comutação, potência suficientemente alta e o preço acessível.

O módulo possui as seguintes características principais:

- Comutação de frequência máxima: até 200 kHz;
- Tensão: 12 V
- Corrente: 30A

O módulo conversor de potência TS-H-12V 30A usado na implementação do protótipo experimental é apresentado na Figura 4.22 (c).

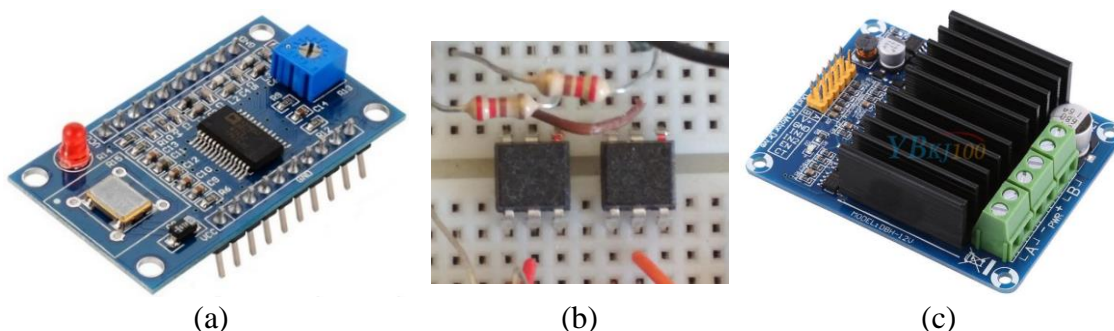


Figura 4.22 – (a) Sintetizador digital direto AD9850; (b) Acopladores óticos; (c) Conversor de potência ZH-30A DC5-12V.

### ***Retificador***

O módulo retificador tem a função de retificar a tensão aos terminais de saída do circuito Rx. Foi decidido usar um módulo ponte prefabricada ultrarrápida de 4 díodos retificadores RHRP3060. A ponte retificadora usada na implementação do protótipo é apresentada na Figura 4.23.

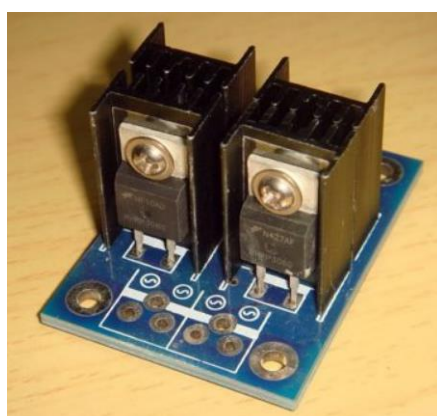


Figura 4.23 – Ponte retificadora.

### ***Adaptador/divisor de tensão***

O módulo de adaptador/divisor de tensão, tem a função de adaptar o nível de tensão da carga para os níveis admissíveis da tensão à entrada do MC e do Conversor A/D. Outra função do adaptador/divisor de tensão é de proteção do MC contra tensões de polarização inversa. O esquema e o módulo de adaptador/divisor de tensão são apresentados na Figura 4.24 (a) e (b), respetivamente.



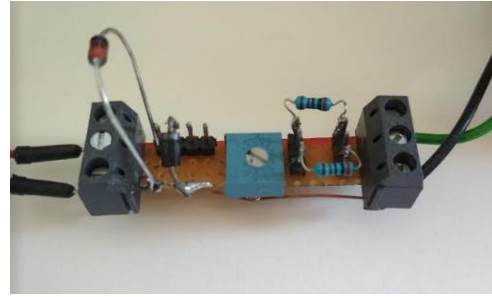
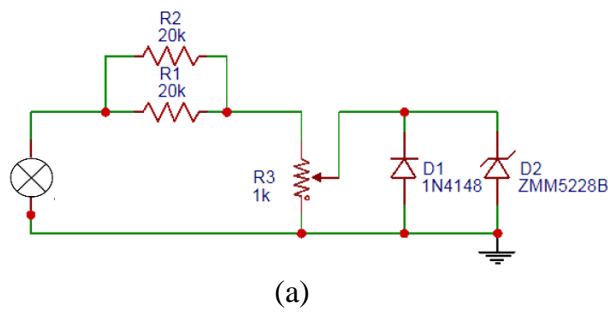


Figura 4.24 – Adaptador/divisor de tensão: (a) esquema; (b) módulo.

### ***Bobinas Tx e Rx***

O módulo de circuitos Tx e Rx está constituído pelos circuitos LC correspondentes e tem função de transferência de energia por acoplamento indutivo ressonante. O valor da potência na carga no protótipo experimental implementado é relativamente baixo, i.e., da ordem de W, para um valor da distância entre as bobinas dos circuitos Tx e Rx da ordem de alguns mm. As bobinas utilizadas nos circuitos Tx e Rx têm a configuração plana na forma de "O" estando envolvidas por um núcleo maciço de ferrite EE6527. As bobinas estão constituídas por fio de cobre envernizado do tipo Litz  $21 \times \varnothing 0.18$  mm estando enroladas em duas camadas com 18 espiras em cada camada. Na Figura 4.25 é apresentada a configuração das bobinas Tx e Rx e das placas de ferrite, respetivamente.

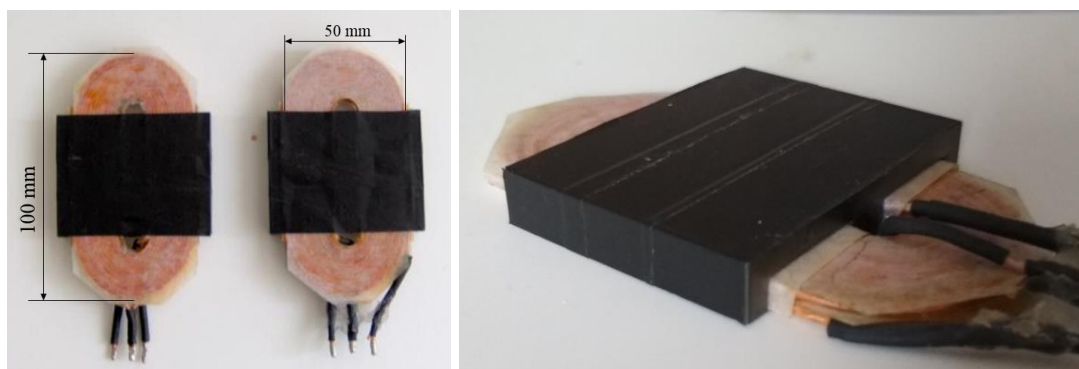


Figura 4.25 – Configuração das bobinas Tx e Rx e das placas de ferrite.

Os parâmetros dos circuitos Tx e Rx do protótipo experimental são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros dos circuitos Tx e Rx do protótipo experimental

Parâmetros	Designação	Valor
$L_1$	Auto-indutância de bobina Tx	76 $\mu\text{H}$
$L_2$	Auto-indutância de bobina Rx	77.1 $\mu\text{H}$
$R$	Resistência de bobina Tx/Rx	100 $\text{m}\Omega$
$N_1/N_2$	Número de espiras nas bobinas Tx/Rx	36/36
$C_1/ C_2$	Capacitância do lado Tx/Rx	0.033 $\mu\text{F}$
$R_L$	Resistência de carga	9 - 100 $\Omega$
$f_{res}$	Frequência de ressonância do circuito isolado	100.5 kHz

***Carga***

O módulo de carga usado no protótipo é uma lâmpada incandescente, com a tensão de 12 V e potência 5 W é apresentado na Figura 4.26.



Figura 4.26 – Lâmpada incandescente usada como carga.

A vantagem de usar uma lâmpada consiste também em visibilidade de variações de intensidade luminosa no processo de transferência da energia.

***Protótipo experimental***

O protótipo experimental do sistema de TESC implementado é apresentado na Figura 4.27 e na Figura 4.28.



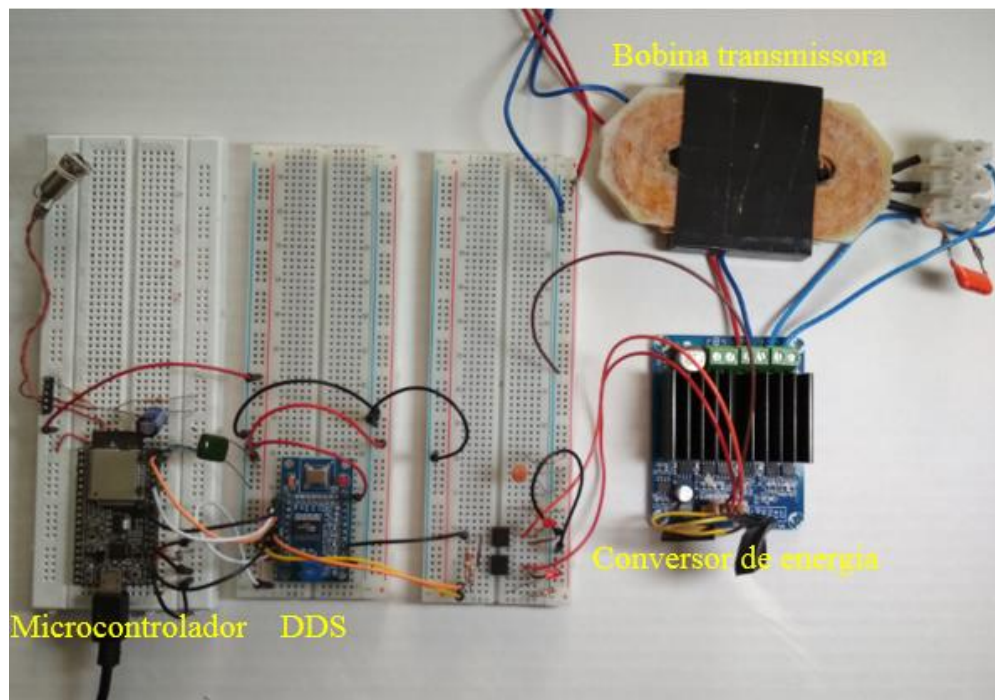


Figura 4.27 – Protótipo experimental implementado: lado Tx.

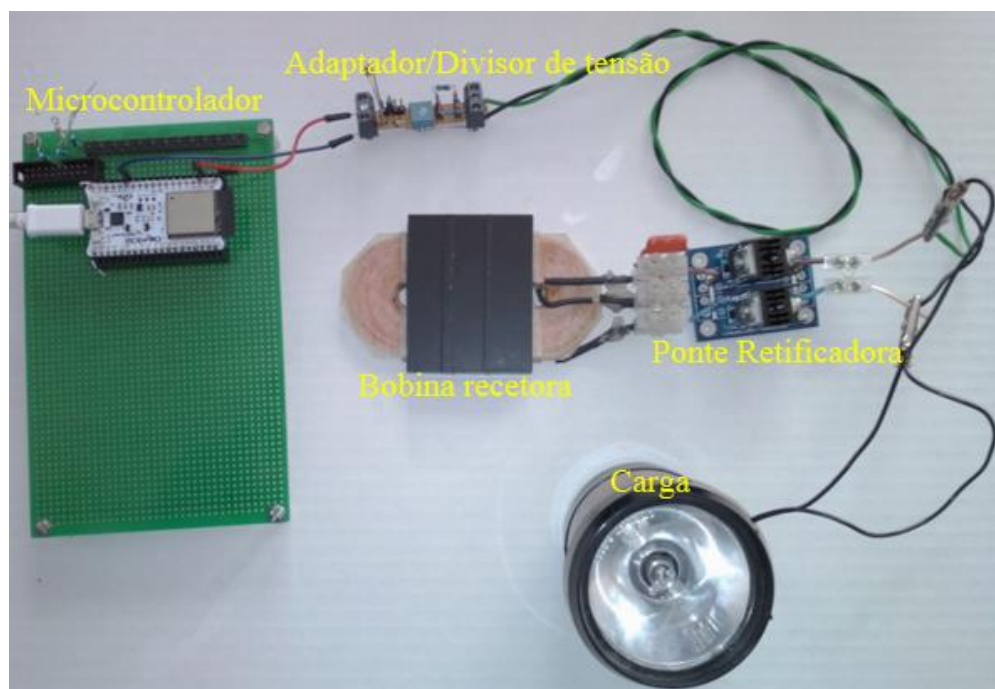


Figura 4.28 – Protótipo experimental implementado: lado Rx.

O protótipo experimental implementado do lado Tx e do lado Rx é apresentado na Figura 4.29.

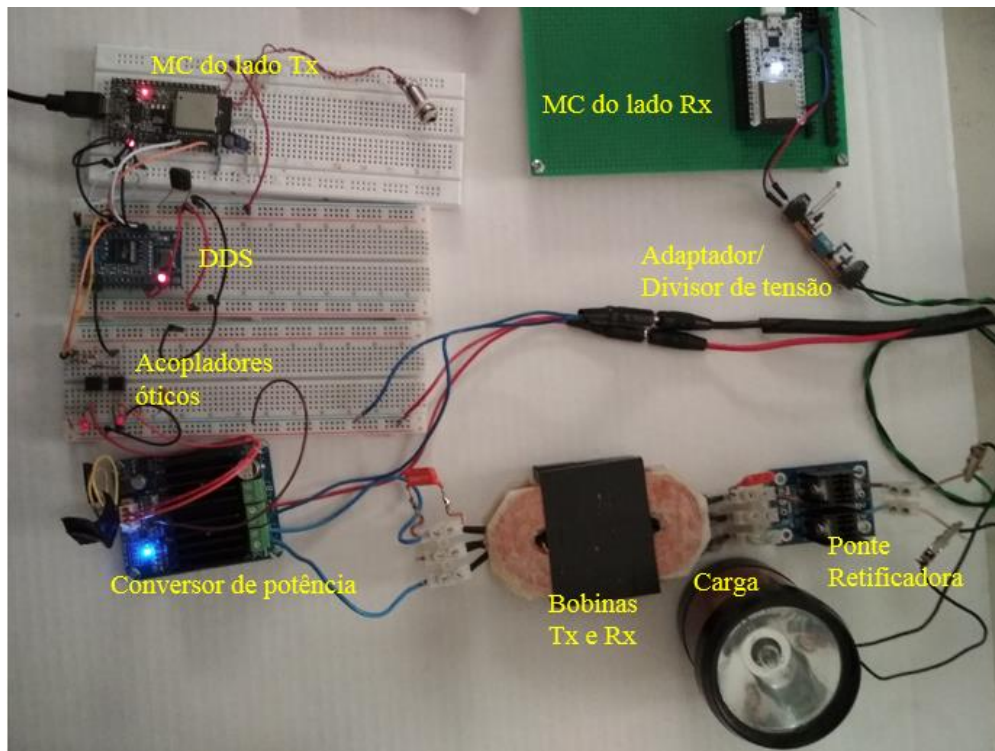


Figura 4.29 – Protótipo experimental implementado do lado Tx e Rx.

## 4.6 Aplicação computacional

A aplicação computacional desenvolvida permite a sintonização da frequência de operação do sistema de TESC para a frequência de ressonância. Assim, é possível efetuar compensação dos eventuais desalinhamentos e variação de distância entre o Tx e o Rx.

A aplicação computacional é realizada em linguagem C. Como sistema operativo foi usado o FreeRTOS (*Free Real Time Operating System*). Como ambiente de desenvolvimento integrado foram utilizados bibliotecas, compiladores e outras ferramentas do Espressif ESP-IDF (*Espressif Internet of Things Development Framework*).

A aplicação computacional é desenvolvida como uma aplicação multitarefa (*multi-task application*) que permite uma execução praticamente em tempo real. As

tarefas comunicam entre si usando um mecanismo de troca de mensagens (caixas de correio).

A aplicação computacional desenvolvida para o MC do lado de Tx é constituída pelas seguintes tarefas:

- Tarefa de coordenação principal; implementa a máquina de estados do programa. A máquina de estados é acionada por eventos e comandos externos. Os eventos e comandos são gerados por outras tarefas;
- Tarefa DDS; implementa o driver do Sintetizador digital direto AD9850;
- Tarefa Bluetooth; implementa a comunicação BLE com o cliente do lado Rx;
- Tarefa interface de utilizador; implementa receção, processamento e o relatório de comandos do utilizador.

Para o funcionamento do protótipo são definidos os seguintes estados e eventos do sistema de TESC em simultâneo com TDSF:

Estados do sistema de TESC (*Wireless Power Transfer*, WPT):

- WPT\_IDLE – TESC não está inicializado;
- WPT\_WAIT\_CONNECTION – TESC a espera de conexão;
- WPT\_CONNECTED – TESC conetado;
- WPT\_SCANNING – TESC no estado de varrimento de frequência a procura de frequência de ressonância  $f_{res}$ ;
- WPT\_RUNNING – TESC no estado de transmissão de energia na  $f_{res}$ ;
- WPT\_INVALID\_STATE – TESC no estado inválido.

Eventos de dispositivos de TESC:

- WPT\_EV\_BT\_ON – evento de TESC Bluetooth ligado;
- WPT\_EV\_BT\_OFF – evento de TESC Bluetooth desligado;
- WPT\_EV\_USER\_CMD – TESC\_evento\_comando do utilizador;
- WPT\_EV\_INVALID – WPT\_evento\_inválido.

O processo de sintonização da frequência do sistema para a frequência de ressonância  $f_{res}$  é realizada no estado WPT\_SCANNING de maneira seguinte: o MC do lado de Tx ordena a frequência inicial  $f_{inic}$  para o DDS que vai gerar as duas ondas quadradas de fase oposta com a determinada frequência. As ondas geradas

pelo DDS fornecem comandos para as duas diagonais da ponte do conversor de potência. Sendo assim, o conversor impõe uma onda quadrada com a frequência  $f_{inic}$  na entrada do circuito Tx e a energia elétrica é transferida para o circuito Rx. O valor da tensão na carga, correspondente à frequência  $f_{inic}$  é medido nos terminais da carga e enviado para o adaptador/divisor de tensão, cuja função é enviar uma fração de tensão de carga para o MC do lado Rx. Assim, a tensão de carga representada pela fração obtida pelo divisor de tensão é redimensionada e enviada via Bluetooth pelo MC do lado de Rx para o MC do lado de Tx durante o intervalo do tempo  $\Delta t$ . O MC do lado de Tx regista os valores dos dados de frequência e de tensão numa *lookup table*. Para a construção de *lookup table* o MC do lado Tx ordena incrementos na ordem desejada, i.e. 200 Hz, de cada vez até à realização de um varrimento completo. O varrimento completo é realizado até à  $f_{final}$  num determinado intervalo de frequências, nomeadamente, entre 30 kHz e 70 kHz para o protótipo experimental desenvolvido. Uma vez construída a *lookup table* o MC do lado de Tx considere o valor da frequência correspondente ao valor máximo da tensão na carga  $V_{max}$  como a frequência de ressonância.

O processo de sintonização da frequência do sistema termina quando a frequência de ressonância é encontrada. Uma vez encontrada a frequência de ressonância o MC do lado de Tx ordena o DDS ajustar a frequência de operação para esse valor iniciando a transferência da energia para o Rx. Assim, o sistema passa a funcionar no modo de transferência da energia. O pseudocódigo do algoritmo de sintonização do lado Tx para a frequência de ressonância é apresentado de seguida.

### ***Pseudocódigo do algoritmo de sintonização do lado Tx***

#### **Variáveis importantes**

Definição de estados de TESC:

```
WPT_IDLE;
WPT_WAIT_CONNECTION;
WPT_CONECTED;
WPT_SCANNING;
```

```
WPT_RUNNING;
WPT_INVALID_STATE;
```

Definição de eventos de dispositivos de WPT:

```
WPT_EV_BT_ON;
WPT_EV_BT_OFF;
WPT_EV_USER_CMD;
WPT_EV_INVALID;
```

Definição de parâmetros usados para procura de frequência de ressonância:

$f_{inic}$	valor inicial do intervalo de frequências;
$f_{final}$	valor final do intervalo de frequências;
$f_{res}$	frequência de ressonância;
$\Delta f$	valor de incremento de frequência em cada iteração;
$\Delta t$	intervalo de tempo de espera entre cada iteração;
$f_{corr}$	frequência corrente;
$V_{corr}$	tensão na carga correspondente à frequência corrente;
$V_{max}$	tensão na carga correspondente à frequência de ressonância;

Definição das variáveis usadas dentro de instância WPT Tx

```
state          // estado;
mbox           // caixa de correio;
mbox_timeout   // tempo limite;
bt_on          // Bluetooth ligado;
```

### Realização de máquina de estado - MC do lado Tx

Inicialização do estado interno

**loop** forever

```
// esperar na caixa de correio por mensagens (msg):
// eventos (EV), comandos (CMD) ou tempo limite (timeout)
msg=mbox_fetch (mbox, mbox_timeout) // verificar caixa de correio
if (há msg)
    // processar msg
    switch msg
    case msg == WPT_EV_BT_ON:
        state = WPT_CONNECTED
    case msg == WPT_EV_BT_OFF:
        state = WPT_WAIT_CONNECTION
    case msg == WPT_EV_USER_CMD:
        if cmd == "change parameters"
            renovar os parâmetros do processo de varrimento de frequências
            ( $f_{inic}$ ,  $f_{final}$ ,  $step \Delta f$ ,  $step \Delta t$ )
        else if cmd == "gs" (go step)
            // começar o varrimento de frequências para encontrar  $f_{res}$ 
```

```

        mudar o estado para WPT_SCANNING
    else if cmd=="g" (go)
        // começar a transferência de energia na  $f_{res}$ 
        mudar o estado para WPT_RUNNING
    end switch msg
end if (há msg)

// Processamento de máquina de estados
switch (estado)
    case WPT_IDLE:
    case WPT_WAIT_CONNECTION:
        WPT-Transmitter publica o seu estado

    case WPT_CONNECTED:
        preparar receção de dados do Rx
        mudar o estado para WPT_RUNNING
        publicar o seu estado

    // começar o processo do varrimento de frequência
    // lendo os valores de tensão de carga
    case WPT_SCANNING:
        ordenar  $f_{corr}$ 
        esperar  $\Delta t$ 
        ler o valor de tensão na carga  $V_{corr}$ 

        if  $V_{corr} >$  de todos valores anteriores
             $V_{corr} = V_{max}$ 
             $f_{res} = f_{corr}$ 

            incrementar  $f_{corr} = f_{res} + \Delta f$ 

            if  $f_{corr} > f_{final}$ 
                mudar o estado para WPT_RUNNING

        // transferir energia na  $f_{res}$  definida no estado WPT_SCANNING
    case WPT_RUNNING:
        ordenar  $f_{corr} = f_{res}$  // começar a transferência de energia na  $f_{res}$ 
        esperar  $\Delta t$ 
        ler o valor de tensão na carga  $V_{corr}$  correspondente a  $f_{res}$ 
        publicar os valores de tensão na carga  $V_{corr}$  e de  $f_{res}$ 

    case WPT_xxxx
        .....

end switch
end loop forever

```

A maioria das ações do MC do lado Rx são implementadas dentro da tarefa BLE.

O objetivo da tarefa:

- Detetar a presença do servidor BLE (usando o serviço Bluetooth Discovering);
- Conectar a este servidor BLE;
- Enquanto a conexão estiver ativa, fornecer o fluxo de dados (*data stream*) com os valores de tensão na carga ao MC do Tx. Os valores de tensão na carga são medidos pelo Conversor A/D (*Analog-to-Digital Converter*, ADC).

O pseudocódigo da sintonização do sistema para a frequência de ressonância do lado Rx é apresentado de seguida.

### ***Pseudocódigo do algoritmo de sintonização do lado Rx***

BLE Task()

    Inicialização do estado interno

**while** (WPT Transmitter advertiser não está detetado)

**listen** for BLE advertiser

**if** (há advertiser)

**if** (advertiser === WPT\_Transmitter)

                salvar o endereço BT

**break**

**end while**

    // conectar o BLE ao WPT\_Transmitter

    conectarBT (BT\_Address)

**while** (conexão BLE é ativa) **do**

        // ler os valores de tensão na carga fornecidos pelo conversor A/D

        volt = ADC\_Measure ()

        // enviar os valores de tensão na carga para WPT-Transmitter

        send\_volt() // envia o valor de tensão na carga para WPT-Transmitter

**end while**

    .....

**end BLE Task()**

## **4.7 Conclusões**

Neste capítulo é apresentada a modelação elétrica do sistema de TESC. A modelação eletromagnética do sistema de TESC é realizada recorrendo ao método

dos elementos finitos sendo apresentada uma introdução ao FEM no Anexo 1. A modelação eletromagnética é apresentada no Anexo 2. É apresentada a implementação do protótipo experimental e do canal de comunicação entre o Tx e o Rx recorrendo ao uso de MCs. O desenvolvimento de aplicação computacional para coordenação do funcionamento do sistema permite sintonizar a frequência do funcionamento do protótipo experimental para o regime de ressonância. O rendimento do sistema de TESC é uma função da frequência de operação e dos parâmetros do circuito.



---

## CAPÍTULO

# 5

---

## Resultados

*Neste capítulo são apresentados os resultados da simulação e da medição dos campos elétricos irradiados pelos sistemas de TESC, considerando dois casos de estudo para diferentes distâncias entre as bobinas Tx e Rx. É apresentada a comparação dos resultados numéricos das simulações computacionais com os valores resultantes das medições do campo elétrico irradiado pelos sistemas. Ainda, neste capítulo são apresentados os resultados do funcionamento do protótipo experimental de TESC com o canal de comunicação entre o transmissor e o recetor implementado que permite a sintonização de frequência de operação do protótipo para o regime de ressonância.*

## 5.1 Introdução

Neste trabalho é abordado o tema da simulação e da medição dos campos elétricos irradiados pelos sistemas de TESC. A bibliografia disponível dedica mais atenção à modelação, à simulação e à medição do campo magnético  $H$  e fluxo magnético  $B$  produzidos pelo sistema de TESC [Ahn10, Christ13, Feliziani13, Chang14, Kim14a, Kim14b, Gao15, Isaev16, Pinto17, Wen17], uma vez que a transferência da energia EM nos sistemas de TESC é realizada por meio do campo magnético [Romba18]. Assim, existe uma lacuna relativamente ao estudo dos campos elétricos irradiados pelo sistema de TESC.

Como foi mencionado no Capítulo 3 os campos eléctrico  $E$  e magnético  $H$  na zona do campo próximo estudado neste trabalho são desacoplados, tendo comportamento independente [ANACOM07]. Até agora, há uma lacuna nos estudos dedicados à simulação e medição do campo eléctrico incidente  $E$  produzido pelos sistemas de TESC. Os mecanismos de acoplamento das componentes do campo eléctrico e o campo magnético incidentes são diferentes, pelo que os campos eléctrico e magnético devem ser determinados separadamente para uma caracterização mais completa da exposição humana [IARC13].

Assim, a simulação e a medição do campo eléctrico é importante para a caracterização global da exposição humana. Uma das contribuições deste trabalho é o estudo do campo eléctrico produzido pelo sistema de TESC e a exposição humana a esses campos, tendo em consideração a possibilidade de haver seres vivos nas imediações próximas do VE durante o carregamento da bateria.

As simulações e as medições do campo eléctrico são expostas em dois casos de estudo. O objetivo do Caso de Estudo\_1 é a simulação e a medição de intensidades do campo eléctrico produzido pelo protótipo da Universidade Técnica de Sófia. O objetivo do Caso de Estudo\_2 é a simulação e a medição de intensidades do campo eléctrico produzido pelo protótipo da Universidade Nova de Lisboa. Os sistemas de TESC do Caso\_de\_Estudo\_1 e do Caso\_de\_Estudo\_2 podem ser definidos como

os sistemas com acoplamento fraco, cujo coeficiente de acoplamento não ultrapassa o valor de 0.2.

O Caso de Estudo\_3 tem por objetivo validar o funcionamento do protótipo experimental de sistema de TESC com o sistema de transmissão de dados sem fios entre o Tx e o Rx implementado. Para a validação do protótipo experimental foi realizada uma avaliação do funcionamento da aplicação computacional desenvolvida para a coordenação do processo da sintonização do sistema para frequência de ressonância e testar o canal de comunicação entre o Tx e o Rx.

## 5.2 Simulação Computacional

Nesta Secção são apresentadas as simulações computacionais obtidas para dois casos de estudo. No Caso de Estudo\_1 é simulado o campo elétrico e o campo magnético do protótipo de TESC localizado no Laboratório do Departamento de Eletrónica de Potência da Universidade Técnica de Sófia em Bulgária. No Caso de Estudo\_2 é simulado o campo elétrico e o campo magnético do protótipo de TESC localizado no Laboratório de Eletrónica de Potência da FCT da Universidade Nova de Lisboa.

A simulação do campo EM produzido pelo sistema de TESC foi realizada usando o programa computacional COMSOL Multiphysics. Para a simulação do sistema de TESC com parâmetros definidos foi utilizado o módulo AC/DC no domínio de frequência (*Frequency Domain*) do COMSOL. Nas simulações realizadas foi utilizada a interface física de Campos Magnéticos (Magnetic Fields). Na física de campos magnéticos foram investigadas as bobinas Tx e Rx utilizados para transferência de energia. A física dos Circuitos Elétricos (Electric Circuit) foi utilizada para simular outros componentes do sistema Tx/Rx do modelo. A interface física de Campos Magnéticos permite simular as características relativas ao campo magnético e obter os parâmetros do campo elétrico e do campo magnético e a densidade de fluxo magnético. Os resultados numéricos das

simulações são comparados com os resultados de medição do campo elétrico produzido pelos sistemas de TESC.

Nas simulações foram consideradas as seguintes aproximações:

- o sistema de TESC está a funcionar em regime quase-estacionário, sendo as correntes de deslocamento desprezadas;
- a simulação é realizada aplicando ao sistema de TESC a primeira harmónica da forma de onda de tensão retangular, sendo desprezadas as harmónicas de ordem superior;
- o circuito magnético dos sistemas de TESC nesta simulação é considerado linear, i.e., não saturado.

### 5.2.1 Caso de Estudo\_1

Foi realizada a simulação de campo elétrico e do campo magnético do sistema de TESC com potência aos terminais da carga de 800 W para a distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 40$  mm. A distribuição de campo elétrico para a faixa de frequência de 142 kHz e a distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 40$  mm é apresentada na Figura 5.1. A barra de valores à direita ilustra os valores do campo elétrico [V/m] em certas partes do modelo.

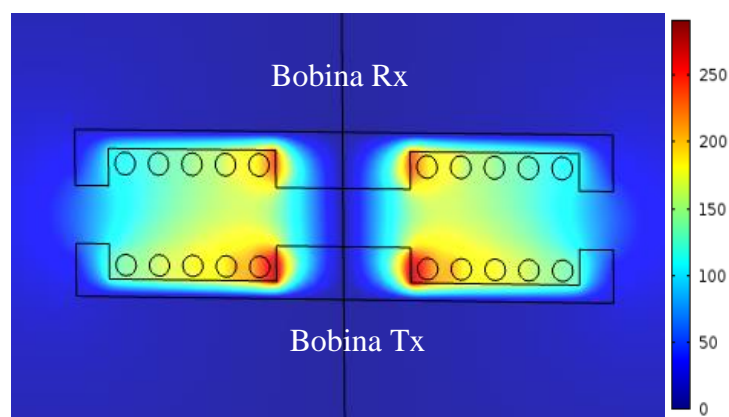


Figura 5.1 – Campo elétrico [V/m] produzido pelo sistema de TESC.

A seguir foi simulada a distribuição do campo elétrico variando a distância  $\Delta$  entre as bobinas Tx e Rx. Na Figura 5.2 são apresentados os resultados de simulação do campo elétrico produzido pelo sistema de TESC para a distância entre as bobinas

de 40 mm e de 80 mm e a distribuição de linhas do campo elétrico. As linhas do campo elétrico são representadas pelas linhas cinzentas.

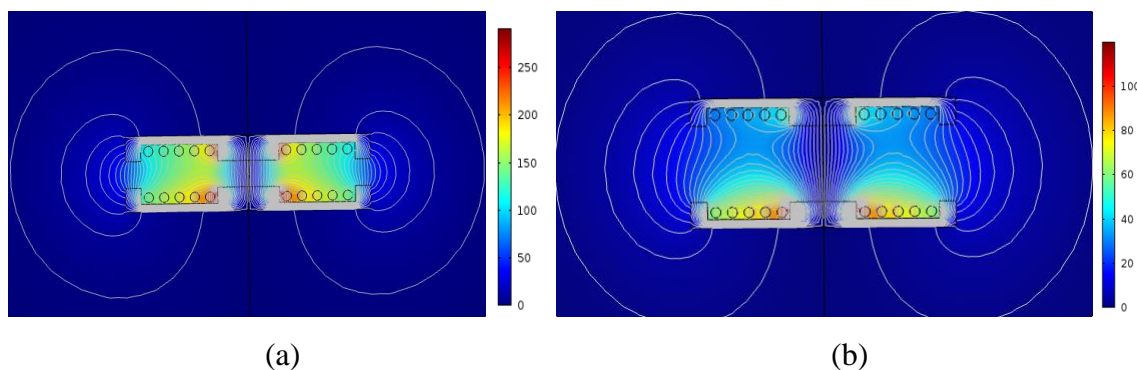


Figura 5.2 – Campo elétrico [V/m] para distâncias entre as bobinas:  
(a)  $\Delta = 40$  mm; (b)  $\Delta = 80$  mm.

Na Figura 5.2 (a) e (b), a intensidade do campo excede o nível de referência ICNIRP, i.e.,  $E = 83$  V/m para público geral, nas regiões limitadas pelo núcleo ferromagnético. Fora dessas regiões, a intensidade do campo é menor e está abaixo dos limites de exposição definidos pela ICNIRP [ICNIRP10]. Estes resultados também confirmam que a intensidade do campo elétrico está diminuindo com o incremento da distância.

Apesar de neste trabalho ser estudado o campo elétrico produzido pelo sistema de TESC, neste capítulo são apresentados resultados numéricos também para o campo magnético para ter uma visão mais ampla do quadro EM dos sistemas de TESC estudados.

Assim, na Figura 5.3 é apresentada a distribuição da densidade do fluxo magnético com núcleo ferromagnético para distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 40$  mm (a) e  $\Delta = 80$  mm (b) e sem núcleo ferromagnético para a distância entre as bobinas de  $\Delta = 40$  mm (c). A barra de valores à direita ilustra os valores da densidade de fluxo magnético  $B$  [T]. As setas brancas representam a magnitude e direção dos vetores de densidade de fluxo magnético. A linha de simetria coincide com a fronteira direita de cada uma das figuras e está marcada como linha vermelha tracejada.

Na Figura 5.3 a densidade de fluxo magnético  $B$  é nula dentro de superfícies condutoras e apresenta as amplitudes diferentes do 0 na área circundante. A Figura 5.3 também mostra que a densidade de fluxo magnético é maior na vizinhança imediata do núcleo ferromagnético e das bobinas, mas diminui rapidamente à medida que se afasta dos mesmos e cai a zero nos limites do domínio de interesse, respeitando a condição de fronteira. Nas regiões exteriores ao núcleo ferromagnético os valores de densidade de fluxo magnético não excedem o nível de referência [ICNIRP10], i.e.,  $B = 27 \mu\text{T}$  para público geral.

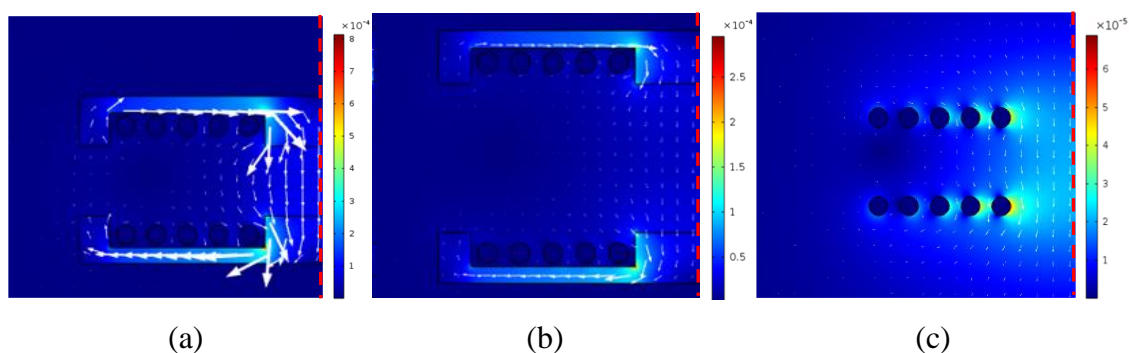


Figura 5.3 – Densidade de fluxo magnético [T] para distâncias entre bobinas:  
(a)  $\Delta = 40 \text{ mm}$ ; (b)  $\Delta = 80 \text{ mm}$ ; (c)  $\Delta = 40 \text{ mm}$  – sem núcleo ferromagnético.

As linhas do campo magnético representadas pelas linhas azuis e a distribuição do fluxo magnético produzido pelo sistema de TESC para distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 40 \text{ mm}$  com e sem núcleo ferromagnético, (a) e (b), respectivamente, são apresentadas na Figura.5.4.

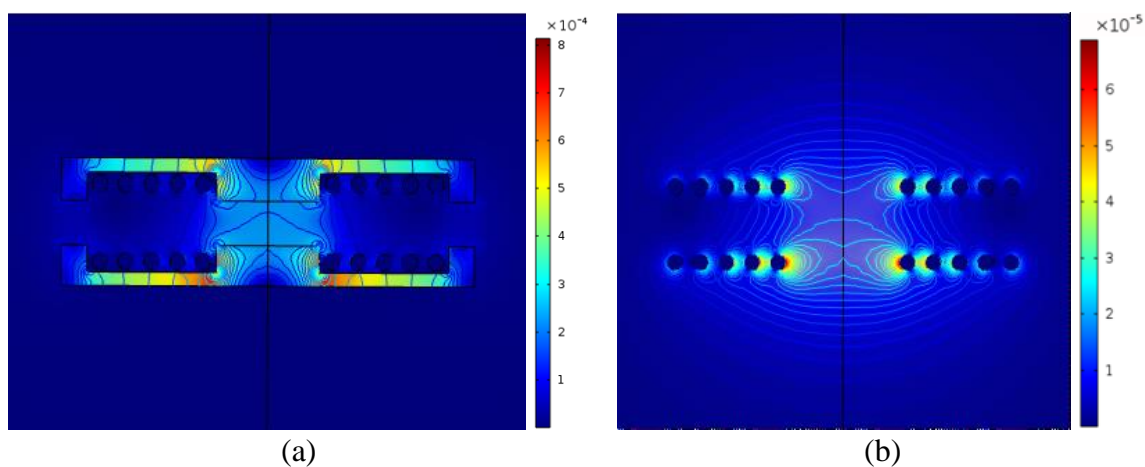


Figura 5.4 – Distribuição do fluxo magnético [T] com e sem núcleo ferromagnético.

Na Figura 5.4 (a) o campo magnético produzido pelo sistema de TESC com núcleo ferromagnético está mais concentrado entre placas do mesmo do que na Figura 5.4 (b), sem núcleo ferromagnético, sendo a dispersão do campo magnético é muito limitada na Figura 5.4 (a). Por outro lado, a densidade do fluxo magnético produzido pelo sistema de TESC é significativamente maior quando o núcleo ferromagnético é aplicado, o que pode ser verificado a partir da barra de valores do lado direito das figuras. Assim, o núcleo ferromagnético torna mais fácil a propagação de campo EM, devido à sua menor relutância, o que incrementa o rendimento de transferência da energia e concentra o campo magnético entre as placas do núcleo, protegendo desta maneira também os objetos biológicos.

Na Figura 5.4 (a) o fluxo magnético é confinado no núcleo ferromagnético com alta permeabilidade magnética, o que reduz o campo magnético disperso. Os resultados da simulação demonstraram a função do núcleo ferromagnético como uma blindagem eficiente que não só confina e guia o fluxo magnético, mas também permita reduzir o campo magnéticos disperso produzido pelo sistema de TESC. A utilização de um núcleo magnético incrementa o valor do campo magnético entre as bobinas Tx e Rx. Sendo assim, a distribuição do campo magnético na presença de núcleo ferromagnético é restrita a região entre as bobinas Tx e Rx. Logo, a simulação é importante para visualizar a distribuição das linhas do campo magnético.

Na Figura 5.5 é apresentada a distribuição de linhas do campo elétrico e do campo magnético produzidos para a distância entre as bobinas  $\Delta = 40$  mm.

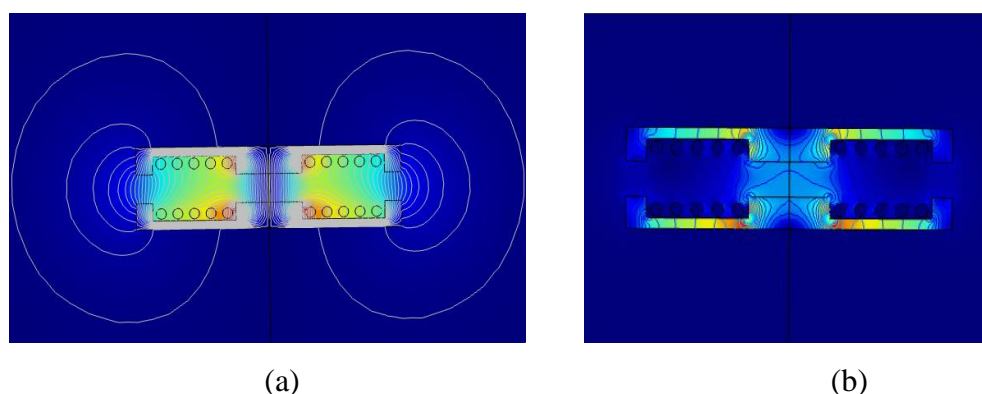


Figura 5.5 – Distribuição de linhas do campo elétrico (a) e do campo magnético (b).

Na Figura 5.5 (a) o campo elétrico produzido pelo sistema de TESC está mais disperso do que o campo magnético, o qual por sua vez está mais concentrado entre as placas do núcleo ferromagnético como é apresentado na Figura 5.5 (b).

Comparando as Figuras 5.5 (a) e 5.5 (b) pode ser concluído que o núcleo ferromagnético de alta permeabilidade é eficiente em desviar/redirecionar e guiar a componente magnética, mas não é suficientemente eficiente em blindar a componente elétrica do campo EM.

Os valores do campo elétrico  $E$  foram determinados a distâncias de 4 cm, 20 cm e 40 cm do sistema de TESC, como no caso dos valores práticos medidos do campo elétrico e são apresentados na Secção 5.5 Discussão dos Resultados, Tabela 5.2.

### 5.2.2 Caso de Estudo\_2

#### *Resultados da simulação em 2D*

Foi realizada a simulação de campos elétrico e magnético do sistema de TESC, sendo o valor da potência aos terminais da carga da ordem dos 300 W para o valor da distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 40$  mm e  $\Delta = 80$  mm, respetivamente. A distribuição do campo elétrico para a faixa de frequência de 20 kHz e para a distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 40$  mm e  $\Delta = 80$  mm é apresentada na Figura 5.6. As linhas do campo elétrico são representadas pelas linhas cinzentas. A barra de valores à direita de cada figura indica os valores do campo elétrico [V/m] em certas partes do modelo.

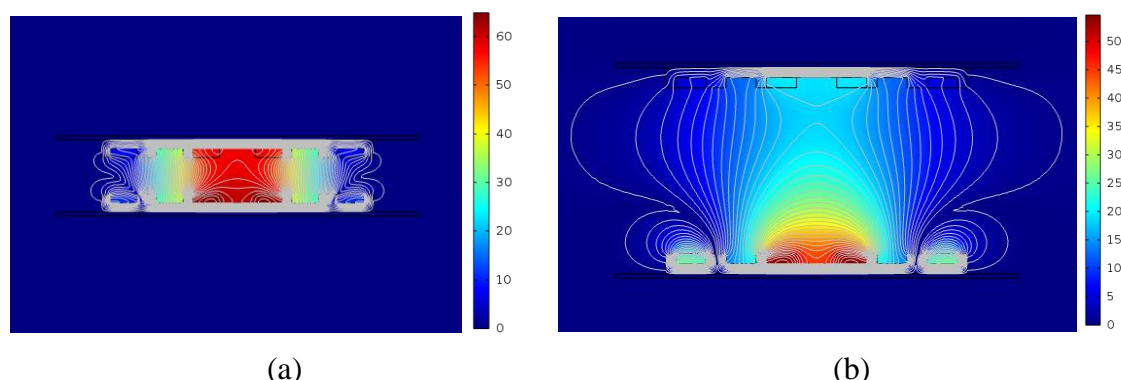


Figura 5.6 – Campo elétrico [V/m] para distâncias entre bobinas: (a)  $\Delta = 40$  mm; (b)  $\Delta = 80$  mm.



Na Figura 5.6, a intensidade do campo não excede o nível de referência ICNIRP, i.e.,  $E = 83 \text{ V/m}$  [ICNIRP10] para público geral dentro e fora das regiões limitadas pelo núcleo ferromagnético.

Na Figura 5.7 é apresentada a distribuição do campo elétrico para o valor da distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 80 \text{ mm}$  para dois cenários, nomeadamente, na presença só do núcleo ferromagnético (a) e na ausência de qualquer tipo de blindagem (b).

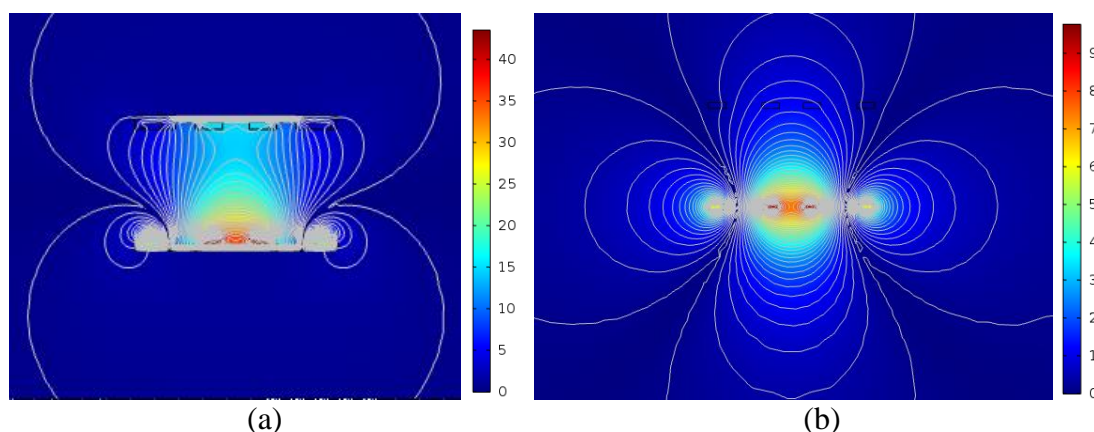


Figura 5.7 – Campo elétrico [V/m]: (a) com blindagem de alumínio;  
(b) sem blindagem.

Na Figura 5.7 (b) na ausência de qualquer tipo de blindagem o campo elétrico é muito disperso, como era de esperar. Na Figura 5.7 (a) o campo elétrico em comparação com a Figura 5.6 (b) é mais disperso e tem o valor mais reduzido devido à ausência de blindagem de alumínio. Assim, a função de blindagem condutiva é reduzir o campo elétrico disperso.

Na Figura 5.8 é apresentada a distribuição da densidade do fluxo magnético entre as placas de blindagem protetora com núcleo ferromagnético para a distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 40 \text{ mm}$  (a) e  $\Delta = 80 \text{ mm}$  (b). A barra de valores à direita ilustra os valores da densidade de fluxo magnético  $B \text{ [T]}$ . As setas brancas representam a magnitude e direção dos vetores de densidade de fluxo magnético.

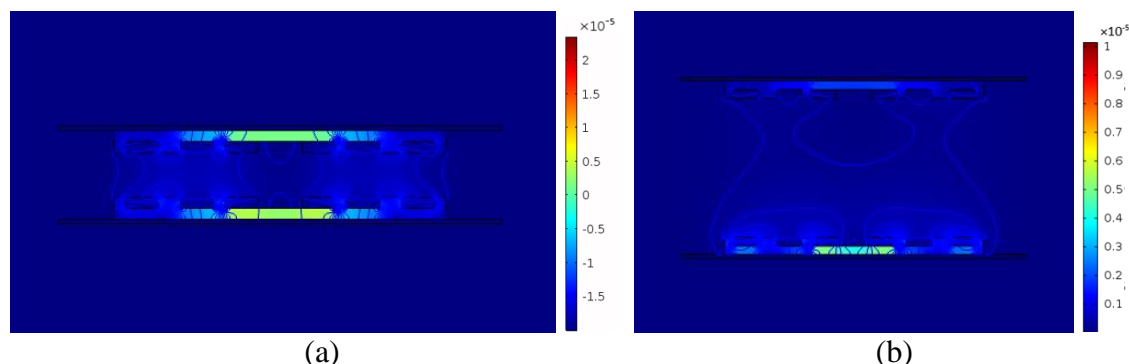


Figura 5.8 – Densidade de fluxo magnético [T] para distâncias entre bobinas:  
(a)  $\Delta = 40$  mm; (b)  $\Delta = 80$  mm.

Na Figura 5.8, a densidade de fluxo magnético não excede o nível de referência ICNIRP, i.e.,  $B = 27 \mu\text{T}$  [ICNIRP10] para público geral dentro e fora das regiões limitadas pelo núcleo ferromagnético. A distribuição do campo magnético devido à presença de núcleo ferromagnético é restrita a região entre as bobinas Tx e Rx.

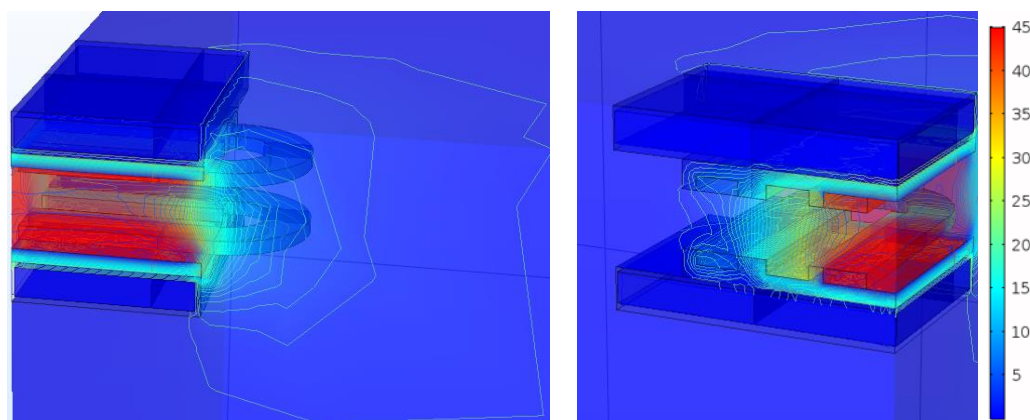
### ***Resultados de simulação em 3D***

Embora o modelo axissimétrico em 2D forneça valores do campo elétrico bastante precisos, um modelo 3D foi configurado como um próximo passo para simular os resultados.

As magnitudes do campo elétrico do sistema de TESC foram simuladas para a distância entre as bobinas de  $\Delta = 40$  mm e  $\Delta = 80$  mm. A distribuição do campo elétrico para o valor da frequência de operação de 20 kHz com linhas de contorno, que representam a magnitude do campo elétrico, é apresentada na Figura 5.9. A barra de valores à direita ilustra os valores do campo elétrico  $E$  [V/m] em certas regiões do modelo.

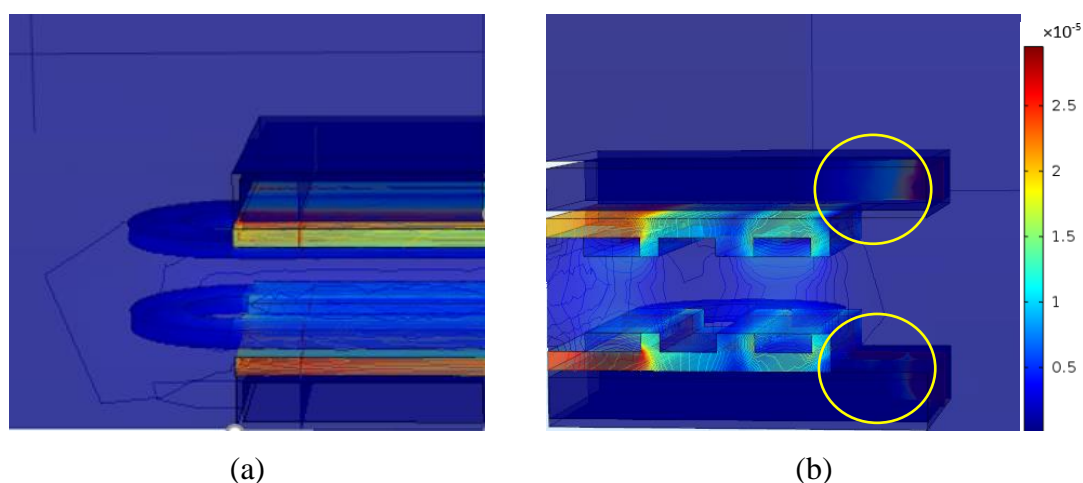
Na Figura 5.9, a intensidade do campo elétrico produzido pelo sistema de TESC não excede o nível de referência ICNIRP, i.e.,  $E = 83$  V/m [ICNIRP10] para público geral dentro e fora das regiões limitadas pelo núcleo ferromagnético e pela blindagem de alumínio e está concentrado nesta zona. A magnitude do campo elétrico é mais elevada nas bordas de blindagem de alumínio. Nas regiões onde o núcleo ferromagnético nem a blindagem de alumínio não cobrem os enrolamentos das bobinas Tx e Rx, o campo elétrico está mais disperso. Devido ao facto que a

blindagem de alumínio usada neste sistema de TESC não cobre totalmente os enrolamentos das bobinas Tx e Rx, a eficiência de blindagem é bastante reduzida. O uso de blindagem que cobre os enrolamentos das bobinas Tx e Rx poderia atenuar a intensidade do campo elétrico produzido pelo sistema de TESC.



(a) (b)  
 Figura 5.9 – Campo elétrico [V/m] produzido pelo sistema de TESC:  
 (a) vista lateral; (b) vista de secção transversal.

Na Figura 5.10 é apresentada a distribuição da densidade do fluxo magnético entre as placas de blindagem de alumínio com núcleo ferromagnético para distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 40$  mm na vista lateral e transversal. A barra de valores à direita ilustra os valores da densidade do fluxo magnético [T] em certas regiões do modelo. As linhas do campo magnético são representadas pelas linhas azuis.



(a) (b)  
 Figura 5.10 – Densidade do fluxo magnético [T] produzido pelo sistema de TESC:  
 (a) vista lateral; (b) vista de secção transversal.

Na Figura 5.10, a densidade de fluxo magnético não excede o nível de referência ICNIRP, i.e.,  $B = 27 \mu\text{T}$  [ICNIRP10] para público geral dentro das regiões limitadas pelo núcleo ferromagnético atingindo o valor máximo de  $25 \mu\text{T}$ . Contudo, é necessário mencionar que devido à diferença das dimensões geométricas do núcleo ferromagnético e da blindagem de alumínio, as bordas do perfil de alumínio, i.e., as zonas assinaladas por circunferências amarelas, ficaram sem suporte do núcleo ferromagnético. Por esse motivo, durante do funcionamento do sistema nestas zonas são induzidas correntes de Foucault como é apresentado na Figura 5.10 (b), resultando em aquecimento por indução da blindagem de alumínio e em incremento das perdas resistivas.

O núcleo ferromagnético e principalmente o escudo de alumínio reduzem o campo elétrico. No entanto, na implementação de sistemas de TESC é necessário projetar a blindagem dupla, i.e., ferromagnética e condutora, com as dimensões geométricas idênticas para evitar a indução das correntes de Foucault na blindagem condutora.

Os valores do campo elétrico foram determinados a distâncias de 4 cm, 20 cm e 40 cm do sistema de TESC, como no caso dos valores práticos medidos do campo elétrico e são apresentados na Secção 5.5 Discussão dos Resultados, Tabela 5.2.

### 5.3 Resultados Experimentais

Nesta secção são apresentados os resultados experimentais provenientes da medição da intensidade de campo elétrico irradiado pelo sistema de TESC, na região do campo próximo.

Uma das técnicas mais usuais na avaliação dos campos EM é a utilização do medidor de campo de banda larga que permite obter os valores do campo elétrico como componente do campo EM numa larga faixa do espectro. Para medir o valor da intensidade do campo elétrico é utilizada a sonda isotrópica. A sonda isotrópica mede o valor eficaz de intensidade do campo numa determinada localização.

Neste trabalho os equipamentos utilizados para medir o campo elétrico no Caso\_de\_Estudo\_1 e no Caso\_de\_Estudo\_2 foram:

- um medidor isotrópico de campo elétrico, para valores de frequência na gama dos 100 kHz a 3 GHz da marca NARDA SRM 3000, calibrado de acordo com a norma ISO 9000, utilizando *software* compatível com *Windows*;
- uma sonda isotrópica para medição do campo elétrico, para valores de frequência na gama dos 75 MHz a 3 GHz, da marca NARDA SRM-3000;
- uma sonda uniaxial para medição do campo elétrico, para valores de frequência na gama dos 9 kHz a 300 MHz, da marca NARDA SRM-3000;
- um medidor do campo elétrico portátil para valores de frequência na gama dos 100 kHz a 3 GHz, de marca PMM 8053A, calibrado de acordo com a norma ISO 9000, utilizando *software* compatível com *Windows*;
- uma sonda isotrópica para medição de campo elétrico para valores de frequência na gama dos 100 kHz a 3 GHz, de marca PMM 8053A, modelo EP-330;
- um tripé de suporte construído em madeira para evitar interferências nas medições.

Foram medidas as magnitudes do campo elétrico, i.e., valores eficazes, geradas pelo protótipo de TESC. Os equipamentos utilizados para medição do campo elétrico no Caso de Estudo\_1 e no Caso de Estudo\_2, nomeadamente, o modelo NARDA SRM-3000 e o modelo PMM 8053A são apresentados na Figura 5.11, (a) e (b) respetivamente.

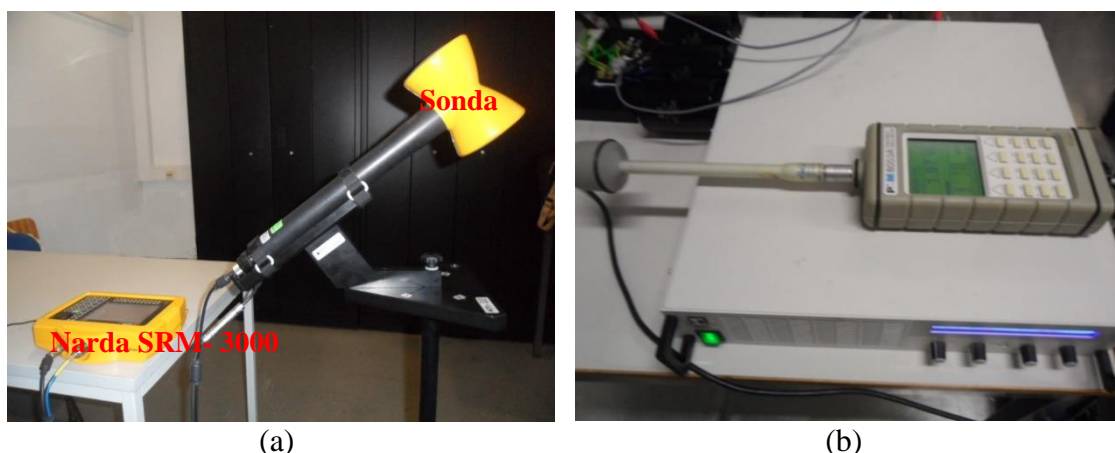


Figura 5.11 – Medidores do campo elétrico: (a) Narda SRM-3000; (b) PMM 8053A.

Tendo em consideração a possibilidade de haver seres vivos nas imediações próximas do VE durante o carregamento da bateria, as medições foram realizadas a distância reduzida do sistema de TESC, i.e., entre os valores de 4 cm e 40 cm.

As medições foram realizadas com o propósito de determinar o valor das emissões do campo elétrico produzido pelo sistema de TESC a diferentes distâncias entre a sonda de medição e o equipamento de TESC.

### 5.3.1 Caso de Estudo\_1

O teste foi realizado no Laboratório de Eletrónica de Potência da Universidade Técnica de Sófia em Bulgária, sendo orientado para a medição da intensidade do campo elétrico produzido pelo protótipo de TESC. O equipamento de teste usado para realizar as medições é composto por um protótipo do sistema de TESC descrito na Secção 5.2.1 e do medidor do campo elétrico Narda SRM-3000.

As características do equipamento experimental utilizado no Caso de Estudo\_1 são apresentadas na Tabela 5.1.

A configuração do protótipo de TESC para o carregamento da bateria de VE estudado no Caso de Estudo\_1 é apresentada na Secção 4.4.1, Figura 4.6.

Tabela 5.1 – Características do protótipo – Caso de Estudo\_1

Item	Especificação
Inversor	$P_{\text{máx}}=5 \text{ kW}$ , frequência 30 kHz–200 kHz
Sistema de Tx e Rx com núcleo ferromagnético	À distância $\Delta$ de 40 mm até 150 mm
HF Retificador	AC RMS 400V/15A, DC 500 V, 10 A
DC carregador	20 V-180 V, 2 A–20 A
Carga eletrónica com resistência programável	entre $5 \Omega$ e $150 \Omega$

Foram realizadas medições dos valores do campo elétrico produzido pelo protótipo de TESC a operar na frequência de 142 kHz. A geração de harmónicas do campo elétrico produzidas pelo sistema de TESC para a distância entre as bobinas

$\Delta=40$  mm, a distância de medição de 4 cm e potência aos terminais da carga  $P_{out} = 800$  W é apresentada na Figura 5.12.

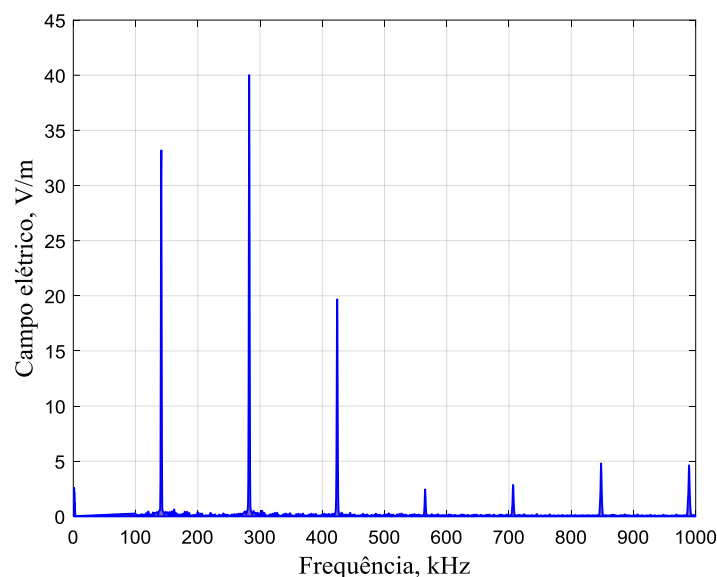


Figura 5.12 – Magnitudes das harmônicas para  $P_{out} = 800$  W.

O conteúdo harmônico apresentado na Figura 5.12 corresponde ao espectro da energia do campo elétrico irradiada pelo sistema de TESC. Considerando que a onda da tensão aplicada ao circuito Tx tem a forma quadrada, o conteúdo do espectro harmônico deveria estar composto por harmônicas de ordem ímpar, conforme a decomposição em série de Fourier. Contudo, o espectro apresenta a existência de harmônicas pares e ímpares apresentadas na Figura 5.26. Este facto é devido a que a onda de tensão aplicada ao circuito de bobina Tx não tem a configuração retangular pura uma vez que o inversor utilizado (Tabela 5.1) é destinado para aquecimento por indução.

Foram medidas as magnitudes do campo elétrico, i.e., valores eficazes, geradas pelo protótipo de TESC com a variação de distância de medição entre 4 cm e 40 cm [Baikova16e]. Na Figura 5.13 são apresentadas as magnitudes das harmônicas do campo elétrico para a distância entre o Tx e o Rx de  $\Delta=40$  mm e potência aos terminais da carga  $P_{out} = 800$  W [Baikova16f].

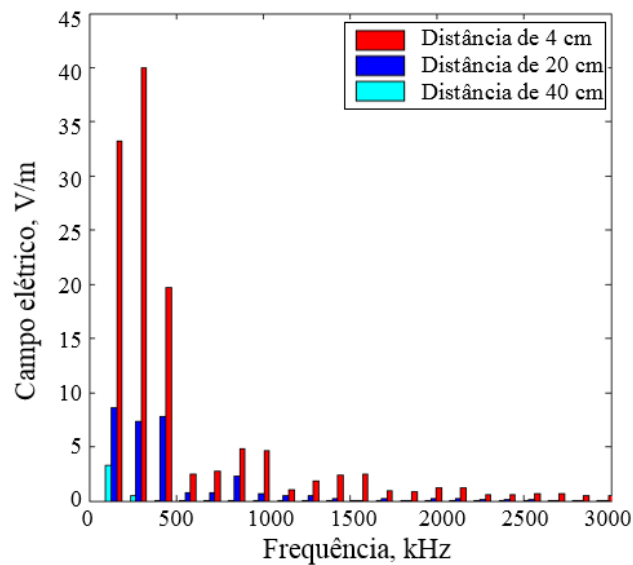


Figura 5.13 – Magnitudes do campo elétrico às diferentes distâncias de medição e  $P_{out} = 800 \text{ W}$ .

As magnitudes do campo elétrico, nomeadamente, da 1ª harmónica, em função da distância à sonda de medição do protótipo de TESC para diferentes valores de potência são apresentados na Figura 5.14.

Na Figura 5.14 pode ser observado que o campo elétrico é muito mais forte diretamente adjacente ao sistema de TESC, mas decresce rapidamente com a distância. A distância do sistema de TESC à sonda de medição é importante [Baikova17b].

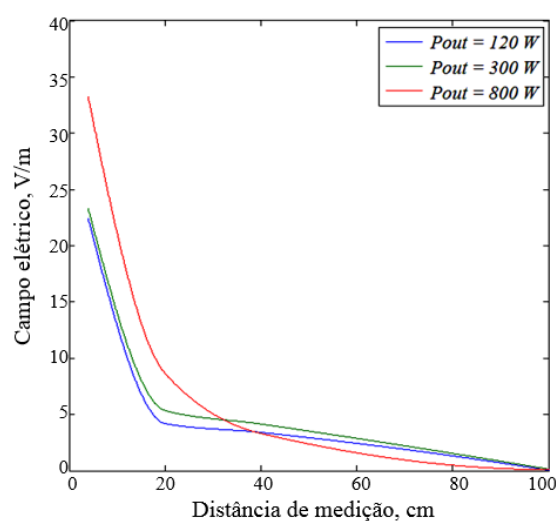


Figura 5.14 – Emissões do campo elétrico às diferentes distâncias de medição.



Como pode ser observado na Figura 5.14, à distância de 40 cm a intensidade das emissões do campo elétrico já é muito baixa. Com incremento dos valores da potência associada à energia transmitida e com redução de distância de medição, as emissões do campo elétrico também se intensificam significativamente.

Os valores das primeiras 20 harmónicas do campo elétrico medido no Caso de Estudo\_1 são apresentados na Secção 5.5 Discussão dos Resultados, Tabela 5.3.

### **5.3.2 Caso de Estudo\_2**

O 1º teste foi realizado no Laboratório de Eletrónica de Potência da FCT da Universidade Nova de Lisboa fora de gaiola de Faraday, sendo orientado para a medição dos valores do campo elétrico produzido pelo protótipo de TESC.

O equipamento de teste usado para realizar medições foi composto por um protótipo do sistema descrito na Secção 4.4.2, Figura 4.12 e medidores do campo elétrico Narda SRM-3000 e PMM 8053A.

#### ***Ensaios realizados em laboratório fora de gaiola de Faraday***

A primeira série de medições foi realizada no Laboratório de Eletrónica de Potência da FCT da Universidade Nova de Lisboa. Foram realizadas as medições dos valores do campo elétrico produzido pelo protótipo de TESC a operar numa frequência de 20 kHz.

As emissões do campo elétrico medido na primeira etapa no ambiente do Laboratório de Eletrónica de Potência com o protótipo de TESC desligado são apresentadas na Figura 5.15.

As emissões do campo elétrico geradas pelo protótipo de TESC para a distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta=40$  mm e para diferentes valores da potência associada à energia transmitida à carga são apresentadas na Figura 5.16.

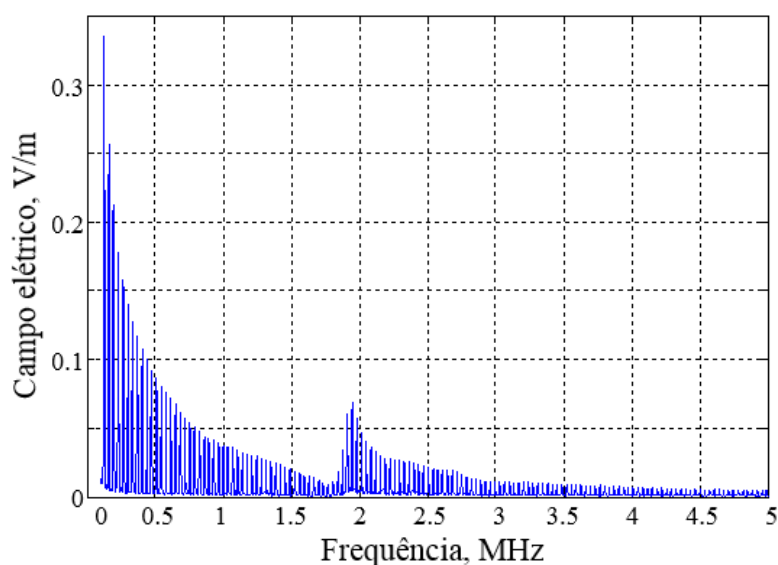


Figura 5.15 – Campo elétrico no ambiente do Laboratório com o protótipo desligado.

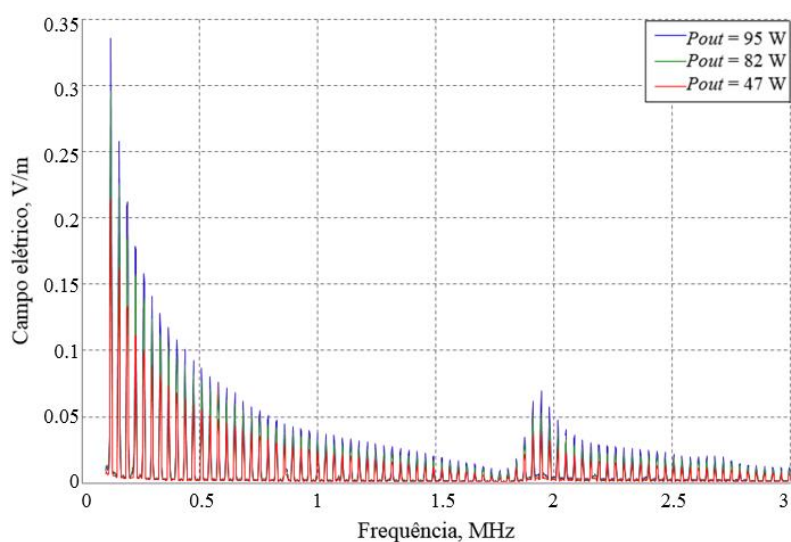


Figura 5.16 – Emissões do campo elétrico em função de potência.

Nas Figuras 5.15 e na Figura 5.16 pode ser observada uma perturbação correspondente a frequência 1.9 MHz derivada provavelmente da existência de um *smartphone* na proximidade do protótipo de TESC, cuja banda de modulação é aproximadamente de 1.9 MHz. Assim, para excluir a influência dos campos EM externos sobre as emissões do campo elétrico produzido pelo protótipo de TESC foram realizadas novas medições dentro de uma gaiola de Faraday localizada na FCT da Universidade Nova.

### ***Ensaaios realizados dentro gaiola de Faraday***

A fim de mitigar a interferência EM externa, reduzir os erros de medição devido aos fatores externos e para proteger a sonda do medidor do campo elétrico de emissões EM de outros equipamentos do laboratório, a segunda série de medições foi realizada dentro de uma gaiola de Faraday. A gaiola de Faraday, existente como sala complementar ao Laboratório Eletrónica de Potência da FCT de Universidade Nova de Lisboa, é construída de placas metálicas fixadas nas paredes, no teto e no chão para garantir uma boa blindagem. O protótipo do sistema de TESC e o equipamento de medição na gaiola de Faraday são apresentados na Figura 5.17.



Figura 5.17 – Protótipo do sistema de TESC na gaiola de Faraday.

A primeira medição da segunda série de dados foi executada com o protótipo de TESC desligado. O campo elétrico na ausência de emissões EM irradiadas pelo sistema de TESC é apresentado na Figura 5.18.

Dentro da gaiola de Faraday o valor do campo elétrico presente no ambiente é mais reduzido, i.e., aproximadamente 100 vezes menor do que o campo elétrico no laboratório (Figura 5.15). No entanto, existem as emissões do campo elétrico irradiadas na gama das frequências entre 100 kHz e 150 kHz. Essa perturbação é devida à interferência proveniente do funcionamento de balastro eletrónico de uma

lâmpada fluorescente instalada na gaiola de Faraday que opera nesse intervalo de frequências.

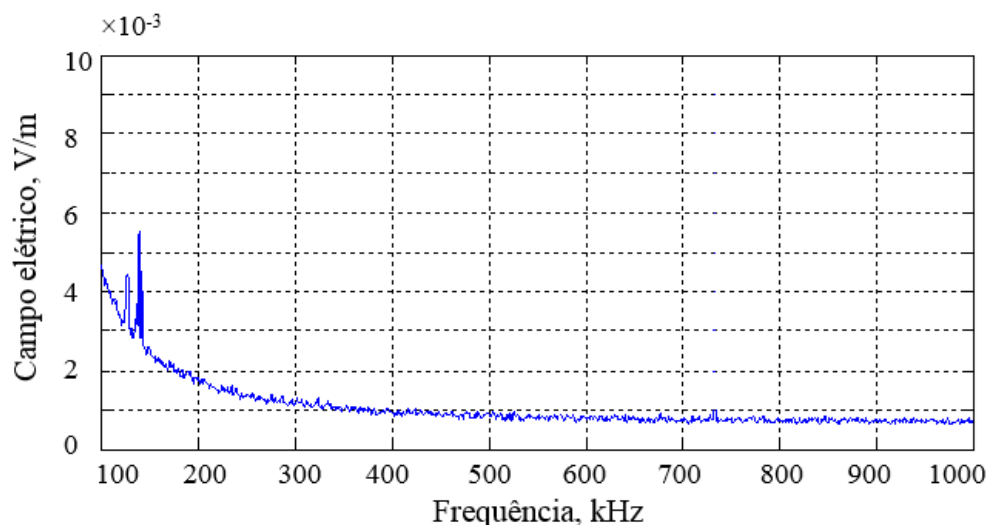


Figura 5.18 – Campo elétrico na gaiola de Faraday com o protótipo desligado.

Na gaiola de Faraday foram realizadas as medições dos valores do campo elétrico produzido pelo protótipo de TESC a operar numa frequência de 20 kHz. A geração de harmónicas do campo elétrico produzidas pelo sistema de TESC para a distância entre as bobinas  $\Delta = 40$  mm, a distância de medição de 20 cm e potência aos terminais da carga  $P_{out} = 262$  W é apresentada na Figura 5.19.

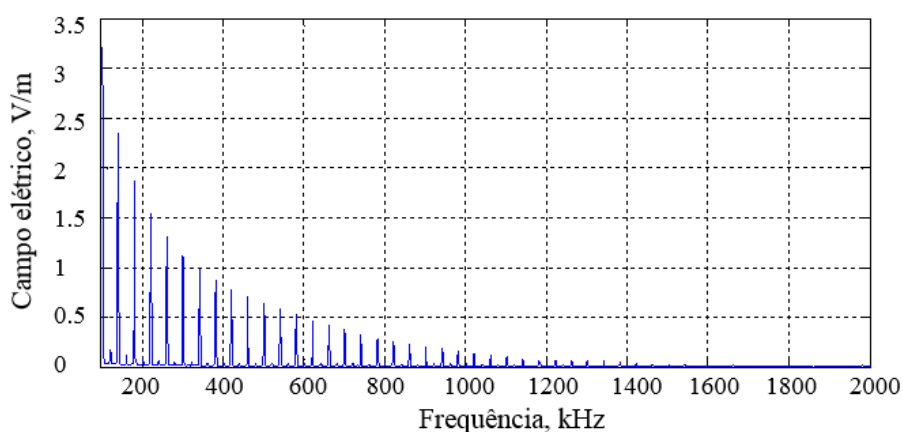


Figura 5.19 – Harmónicas produzidas pelo sistema de TESC.

O equipamento de medição utilizado é indicado para a medição de campos elétricos na gama dos 100 kHz a 3 GHz, de modo que as amplitudes das harmónicas foram medidas a partir da 5ª harmónica, correspondente a 100 kHz. Como pode ser observado na Figura 5.19, no espectro das harmónicas do campo

elétrico são presentes harmónicas ímpares e pares, sendo os valores das harmónicas pares insignificativos em comparação com dos ímpares.

A presença de harmónicas pares no conteúdo harmónico pode ser explicada por a onda de tensão aplicada ao circuito da bobina Tx não ter rigorosamente uma forma retangular, mas sim, aproximadamente retangular. Os valores eficazes das harmónicas pares e ímpares a partir de 5ª harmónica do campo elétrico são apresentados na Figura 5.20.

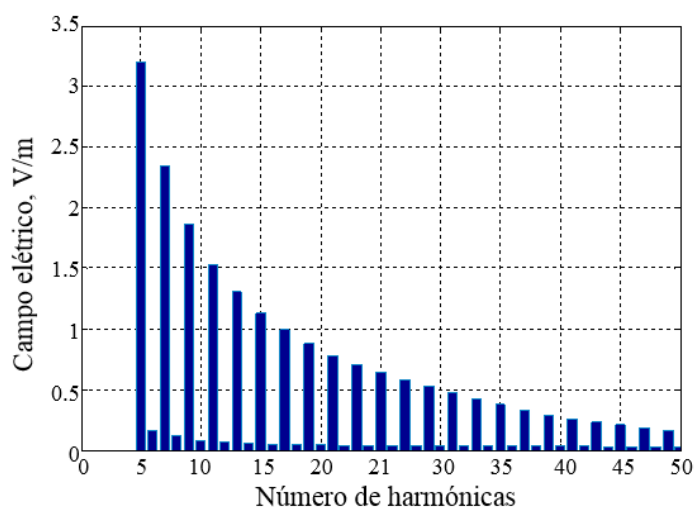


Figura 5.20 – Magnitudes das harmónicas produzidas pelo sistema de TESC.

Para obter as amplitudes da 1ª e da 3ª harmónica foi utilizado o método dos mínimos quadrados, quando se deseja extrapolar ou fazer previsões em regiões fora do intervalo considerado de uma função. Usando o método dos mínimos quadrados, os dados experimentais foram ajustados com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0.9999$  [Baikova18]. O alto valor obtido para o coeficiente de determinação  $R^2$  indica que a linha de tendência se ajusta com bastante precisão aos dados. As magnitudes das harmónicas, incluindo a 1ª harmónica e a 3ª harmónica assinaladas a vermelho geradas pelo sistema de TESC, é apresentada na Figura 5.21.

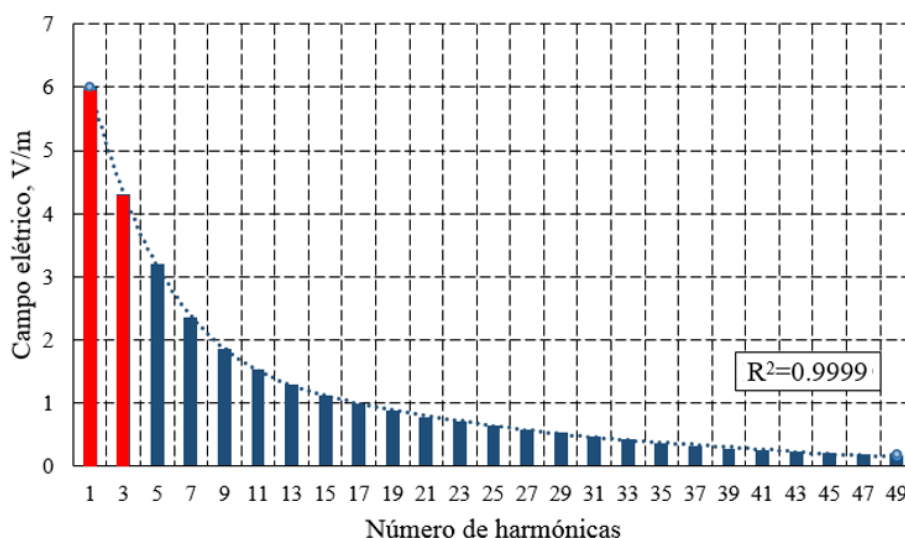


Figura 5.21 – Magnitudes das harmónicas ímpares produzidas pelo protótipo de TESC.

Os valores das primeiras 20 harmónicas do campo elétrico medido no Caso de Estudo\_2 são apresentados na Secção 5.5 Discussão dos Resultados, Tabela 5.3.

### 5.3.3 Impacto das emissões EM sobre o canal de dados

Nesta secção é apresentada a avaliação do impacto das emissões da componente elétrica do campo EM sobre o canal de TDSF. Esta avaliação é realizada utilizando o protótipo de TESC do Laboratório de Eletrónica de Potência da FCT da Universidade Nova de Lisboa (Caso de Estudo\_2). Para avaliar o impacto do campo EM é necessário avaliar uma das taxas, nomeadamente, a taxa de bits errados, BER, a taxa de erros de pacote (*Packet Error Rate*, PER) ou a taxa de transferência do sistema de comunicação (*throughput*) [Baikova16a, Baikova16b, Baikova16c].

O método mais usual para avaliar a qualidade da receção de dados do sistema de TDSF, incluindo o efeito de emissões EM irradiadas e perturbação na comunicação sem fio industrial, é verificar a taxa de erros de pacote PER [Matsuzaki12]. O PER é a percentagem do número de pacotes que não foram recebidos corretamente para o número de pacotes inteiros transmitidos. O PER também é um dos fatores que determina o rendimento e a latência do sistema de comunicação[Matsuzaki12].

Para simular uma conexão entre o Tx e o Rx foram utilizados os dois PCs (*Personal Computer*) com os módulos Bluetooth. Na primeira etapa foi estabelecida a comunicação via Bluetooth entre os dois PCs, um dos quais foi usado como um servidor e outro como um cliente.

Os testes do desempenho das comunicações entre dois PCs via Bluetooth colocados na área de funcionamento do protótipo de TESC foram realizadas com as aplicações computacionais *Iperf3* e *Wireshark*. O envio de pacotes de dados entre o servidor e o cliente foi realizado utilizando a aplicação computacional *Iperf3* [ESnet15]. Uma das ferramentas mais utilizadas para analisar o tráfego da rede, *Wireshark*, tem como função captar e analisar os pacotes de dados que estejam transferidos na rede, nomeadamente, via Bluetooth entre os dois PCs. Esta ferramenta tem uma interface gráfica e analisa o tráfego de pacotes de entrada e saída para determinar aqueles que foram perdidos por erros de transmissão, o que permite avaliar o PER [Lamping08]. Assim, antes de gerar o tráfego no cliente, era necessário correr o *Wireshark* no servidor para posteriormente capturar os pacotes enviados via Bluetooth e analisar os que foram perdidos por erros de transmissão. A configuração do equipamento do ensaio é apresentada na Figura 5.22.

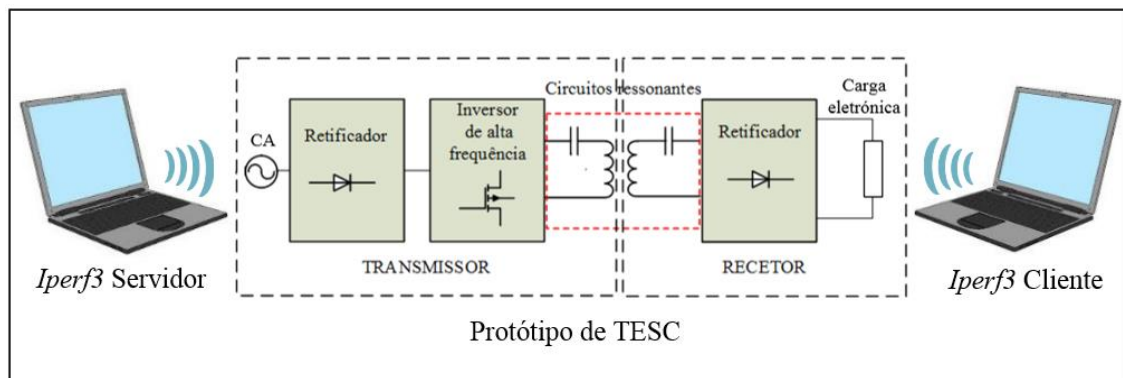


Figura 5.22 – Configuração do ensaio para medição do PER.

O ficheiro de captura de pacotes por *Wireshark* é apresentado na Figura 5.23.



No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.00000000	wistronN_fa:c8:cd	Broadcast	ARP	42	who has 10.0.0.3? Tell 10.0.0.1
2	0.00002100	Cyber-B1_da:71:05	wistronN_fa:c8:cd	ARP	42	10.0.0.3 is at 00:1a:7d:da:71:05
3	0.01994700	10.0.0.1	10.0.0.3	TCP	66	49469-5201 [SYN] Seq=0 win=64512 Len=0 MSS=1437 WS=1 S
4	0.02007000	Cyber-B1_da:71:05	Broadcast	ARP	42	who has 10.0.0.1? Tell 10.0.0.3
5	0.02733400	wistronN_fa:c8:cd	Cyber-B1_da:71:05	ARP	42	10.0.0.1 is at 00:1b:b1:fa:c8:cd
6	0.02734700	10.0.0.3	10.0.0.1	TCP	66	5201-49469 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 win=65535 Len=0 MSS=
7	0.08261200	10.0.0.1	10.0.0.3	TCP	54	49469-5201 [ACK] Seq=1 Ack=1 win=64512 Len=0
8	0.08521600	10.0.0.1	10.0.0.3	TCP	91	49469-5201 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 win=64512 Len=37
9	0.08533900	10.0.0.3	10.0.0.1	TCP	55	5201-49469 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=38 win=212952 Len=1
10	0.09251600	10.0.0.1	10.0.0.3	TCP	58	49469-5201 [PSH, ACK] Seq=38 Ack=2 win=64511 Len=4
11	0.11619300	10.0.0.3	10.0.0.1	TCP	54	5201-49469 [ACK] Seq=2 Ack=42 win=212948 Len=0
12	0.12798000	10.0.0.1	10.0.0.3	TCP	154	49469-5201 [PSH, ACK] Seq=42 Ack=2 win=64511 Len=100
13	0.12830600	10.0.0.3	10.0.0.1	TCP	55	5201-49469 [PSH, ACK] Seq=2 Ack=142 win=212848 Len=1
14	0.13614100	10.0.0.1	10.0.0.3	UDP	46	Source port: 60296 Destination port: 5201
15	0.13650900	10.0.0.3	10.0.0.1	UDP	46	Source port: 5201 Destination port: 60296
16	0.35620500	10.0.0.1	10.0.0.3	TCP	54	49469-5201 [ACK] Seq=142 Ack=3 win=64510 Len=0
17	0.35628200	10.0.0.3	10.0.0.1	TCP	56	5201-49469 [PSH, ACK] Seq=3 Ack=142 win=212848 Len=2
18	0.41901800	10.0.0.1	10.0.0.3	IPv4	1490	Fragmented IP protocol (proto=UDP 17, off=0, ID=0ab5)
19	0.50498900	10.0.0.1	10.0.0.3	IPv4	1490	Fragmented IP protocol (proto=UDP 17, off=1456, ID=0ab5)
20	0.51125300	10.0.0.1	10.0.0.3	IPv4	1490	Fragmented IP protocol (proto=UDP 17, off=2912, ID=0ab5)

Figura 5.23 – O ficheiro de captura de pacotes por *Wireshark*.

Os resultados obtidos demonstraram que não houve pacotes com erros de transmissão de dados nem erros de retransmissões. Assim, pode ser considerado que o protótipo de TESC a operar numa frequência de 20 kHz no Caso de Estudo\_2 não influencia o canal de TDSF que opera a frequência de 2.4 GHz.

## 5.4 Caso de Estudo\_3 – Protótipo Experimental

O Caso de Estudo\_3 tem por objetivo validar o funcionamento do protótipo experimental de sistema de TESC, i.e., avaliar o funcionamento da aplicação computacional desenvolvida para a coordenação do processo da sintonização do sistema para frequência de ressonância e testar o canal de comunicação entre o Tx e o Rx. No sentido de validar o funcionamento do protótipo foram realizados ensaios experimentais. Assim, o protótipo foi submetido a diferentes condições de operação variando distância e desalinhamento axial entre as bobinas Tx e Rx com finalidade de encontrar a frequência de ressonância em cada caso.

O protótipo foi posto a funcionar, tendo a aplicação computacional começar o varrimento de frequências para diferentes casos de variação de distância/desalinhamento entre as bobinas Tx e Rx. Para cada caso de variação de



distância/desalinhamento foi determinada a frequência de ressonância. O *setup* dos ensaios experimentais é apresentado na Figura 5.38.

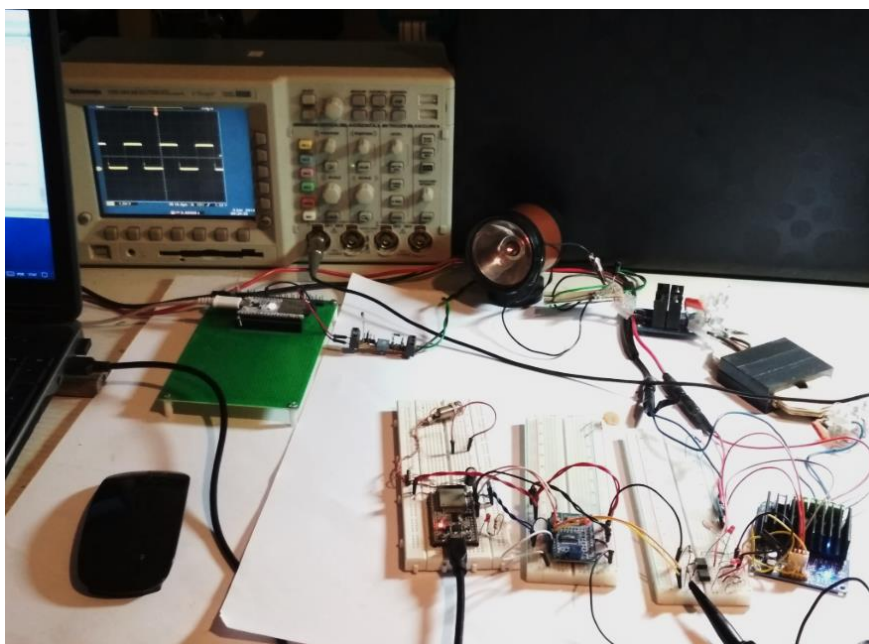


Figura 5.24 – *Setup* dos ensaios experimentais.

A validação foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa foi testada a capacidade do protótipo de determinar a frequência de ressonância para diferentes distâncias  $\Delta$  entre as bobinas Tx e Rx. Na segunda etapa foi testado o funcionamento do protótipo para diferentes desalinhamentos axiais  $\alpha$  entre as bobinas Tx e Rx, sendo o desalinhamento axial o desvio da posição relativa dos eixos longitudinais das bobinas Tx e Rx. O desalinhamento axial entre as bobinas Tx e Rx é apresentado na Figura 5.25.

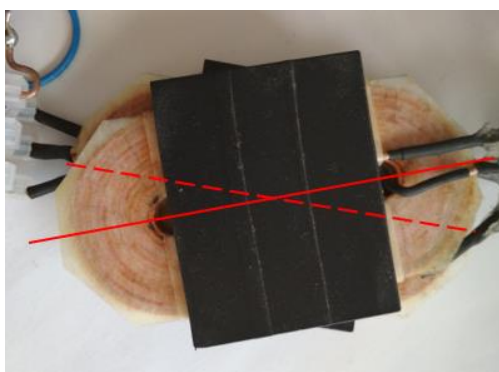


Figura 5.25 – O desalinhamento axial entre as bobinas Tx e Rx.

Os resultados de sintonização do protótipo para a frequência de ressonância em função de distância  $\Delta$  entre as bobinas Tx e Rx são apresentados na Figura 5.26.

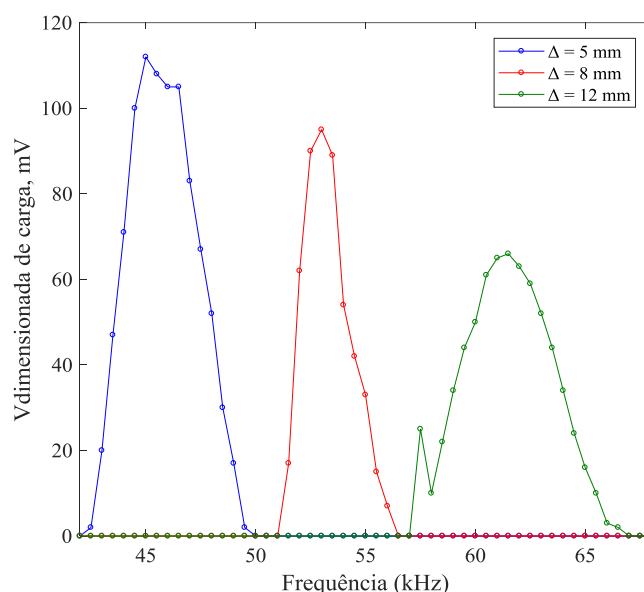


Figura 5.26 – Frequência de ressonância em função de distância entre Tx e Rx.

Como era espectável, a Figura 5.26 mostra que a frequência de ressonância varia significativamente com a distância entre as bobinas Tx e Rx atingindo os valores de 45 kHz, 53 kHz e 61.5 kHz para as distâncias  $\Delta$  de 5 mm, 8 mm e 12 mm, respetivamente. A variação da frequência de ressonância sucede devido à variação da indutância mútua, o que leva à alteração da indutância total do sistema e, consequentemente, à alteração da frequência de ressonância.

Os resultados da sintonização do protótipo para a frequência de ressonância em função de desalinhamentos axiais  $\alpha$  entre as bobinas Tx e Rx são apresentados na Figura 5.27.

Na Figura 5.27 a frequência de ressonância varia significativamente com o desalinhamento entre as bobinas Tx e Rx atingindo os valores de 33 kHz, 39 kHz e 44.5 kHz para os desalinhamentos  $\alpha$  de  $\Delta$  de 0°, 5° e 10°, respetivamente.

O aumento de desalinhamento entre as bobinas Tx e Rx é acompanhado pela diminuição do coeficiente de acoplamento magnético  $k$  e, consequentemente, pela redução de indutância mútua  $M$ , o que leva à alteração de frequência de ressonância.

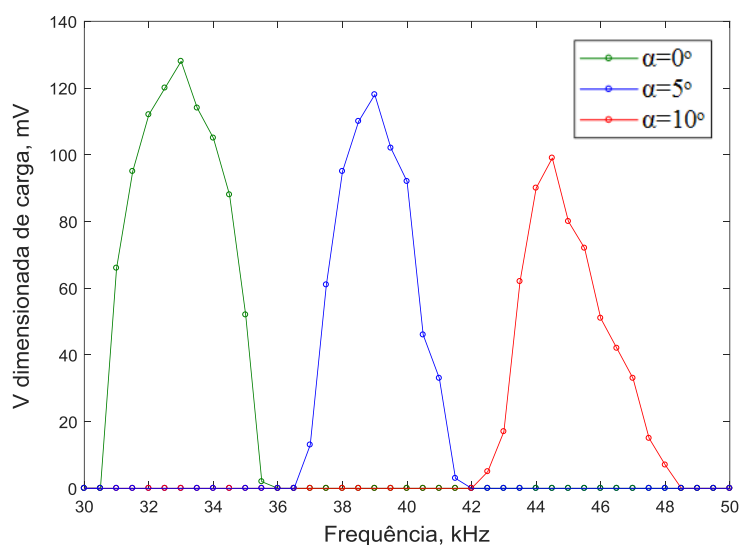


Figura 5.27 – Frequência de ressonância em função de desalinhamento entre Tx e Rx.

Para uma análise dos resultados obtidos experimentalmente, foi calculado o rendimento do protótipo obtido através de (4.13) a (4.15), tendo como base os valores das tensões e correntes medidos experimentalmente. A curva do rendimento do protótipo em função de frequência de operação para uma distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 2$  mm obtido experimentalmente é apresentado na Figura 5.28.

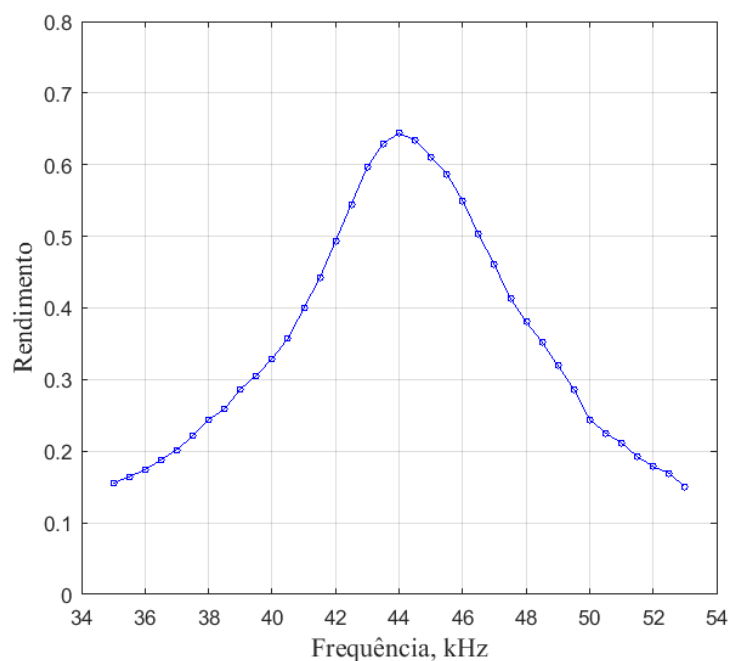


Figura 5.28 – Rendimento do protótipo em função de frequência de operação.

O rendimento do protótipo na transmissão de energia obtido para a distância entre as bobinas Tx e Rx  $\Delta = 3$  mm e desalinhamento nulo é da ordem de 64%.

Como é espectável, as variações de intensidade luminosa de lâmpada acompanham o processo de varrimento de frequências incrementando ou reduzindo à medida que se aproxima ou se afasta da frequência de ressonância  $f_{res}$ . No modo de transferência da energia na  $f_{res}$  a lâmpada apresenta a intensidade luminosa máxima como era de esperar.

## 5.5 Discussão dos Resultados

Nesta secção é feita a discussão dos resultados dos casos de estudo apresentados. As simulações são realizadas aplicando ao sistema de TESC a primeira harmónica da onda da tensão com a forma retangular; os resultados das simulações foram comparados com a magnitude da primeira harmónica do campo eléctrico medido.

A comparação das magnitudes do campo eléctrico medido e simulado para o Caso de Estudo\_1 e para Caso de Estudo\_2 é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Comparação entre os valores do campo eléctrico simulado e medido

Distância de medição (cm)	Distância entre Tx/ Rx Δ= 40 mm					
	Caso de Estudo_1			Caso de Estudo_2		
	Pout = 800 W			Pout = 262 W		
	Magnitude do campo elétrico (1ª harmónica), V/m					
	simulado	medido	diferença	simulado	Medido	diferença
4	31.02	33.19	6.54 %	5.65	6	5.83%
20	7.98	8.65	7.75 %	2.55	2.72	6.25%
40	3,08	3.32	7.2 %	0.53	0.56	5.36%

Os resultados indicam que os valores do campo eléctrico medido e simulado têm uma boa correlação em todos os casos apresentados na Tabela 5.2, revelando um erro máximo de 7.75%. Os resultados numéricos das simulações dos campos eléctricos apresentam valores inferiores relativamente aos valores dos resultados medidos. Esta discrepância é ligeiramente superior para o Caso de Estudo\_1, o que

pode ser explicado pela simplificação realizada no modelo das bobinas. As bobinas Tx e Rx, respetivamente, possuem topologia em espiral, no entanto, o modelo da bobina não tem uma topologia espiral exata. Por esta razão o modelo das bobinas está adaptado para resolver a dimensão espacial axissimétrica em 2D. Por outro lado, os protótipos utilizados no Caso de Estudo\_1 e no Caso de Estudo\_2 não são sistemas lineares. Assim, o erro entre o resultado da simulação e o resultado experimental é explicado pela aproximação de linearidade do sistema considerada na simulação computacional.

Considerando o caso da exposição simultânea a múltiplas frequências foi aplicado o critério estipulado pela ICNIRP [ICNIRP10] (3.8) para avaliar o efeito aditivo dos campos elétricos de diferentes frequências produzidos pelo protótipo de TESC. O resultado de aplicação do critério de exposição a múltiplas frequências e o valor total das primeiras 20 harmónicas do campo eléctrico produzido pelo protótipo de TESC para distância de medição de 4 cm no Caso de Estudo\_1 e no Caso de Estudo\_2 são apresentados na Tabela 5.3.

A partir dos resultados, são feitas as seguintes observações:

- na Figura 5.1 e na Figura 5.2 as regiões onde a intensidade do campo eléctrico excede o nível de referência para a exposição do público geral estabelecido na norma ICNIRP [ICNIRP10] são limitadas pelos núcleos ferromagnéticos;
- no Caso de Estudo\_1 o valor máximo do campo eléctrico registado nas áreas limitadas pelos núcleos ferromagnéticos, para a potência aos terminais da carga  $P_{out} = 800 \text{ W}$ , é de  $250 \text{ V/m}$ , no Caso de Estudo\_2 o valor máximo para a potência aos terminais da carga  $P_{out} = 262 \text{ W}$ , é de  $45 \text{ V/m}$ . No entanto, fora das regiões do núcleo ferromagnético as magnitudes do campo eléctrico estão abaixo dos limites de exposição definidos pela ICNIRP [ICNIRP10] tanto no Caso de Estudo\_1, como no Caso de Estudo\_2;
- os valores do campo eléctrico são uma função da distância para a sonda de medição do sistema de TESC, como esperado (Figura 5.14);

Tabela 5.3 – Valores do campo elétrico medido

Número de harmónica	Caso de Estudo_1	Caso de Estudo_2
	$P_{out} = 800 \text{ W}$	$P_{out} = 262 \text{ W}$
	Distância entre Tx/Rx $\Delta = 40 \text{ mm}$	
	Magnitude do campo elétrico, V/m	
1 <sup>a</sup>	33.193	6.019
2 <sup>a</sup>	40.018	0.465
3 <sup>a</sup>	19.679	4.317
4 <sup>a</sup>	2.454	0.342
5 <sup>a</sup>	2.8526	3.198
6 <sup>a</sup>	4.811	0.167
7 <sup>a</sup>	4.627	2.350
8 <sup>a</sup>	1.057	0.112
9 <sup>a</sup>	1.821	1.861
10 <sup>a</sup>	2.545	0.083
11 <sup>a</sup>	2.458	1.536
12 <sup>a</sup>	0.940	0.066
13 <sup>a</sup>	0.822	1.304
14 <sup>a</sup>	1.202	0.055
15 <sup>a</sup>	1.199	1,128
16 <sup>a</sup>	0.592	0.049
17 <sup>a</sup>	0.612	0.989
18 <sup>a</sup>	0.703	0.043
19 <sup>a</sup>	0.671	0.876
20 <sup>a</sup>	0.453	0.039
Total de harmónicas $\sum E_j$ , V/m		122.711
Nível de referência $E_R$ , V/m [ICNIRP10]		83
Coeficiente de exposição $k_{exp} = \sum E_j / E_R$		1.478

- o campo elétrico  $E$  é muito mais forte na proximidade ao sistema de TESC, mas diminui inversamente proporcional ao quadrado de distância ao ponto de medição,

i.e.,  $E \propto \frac{1}{d^2}$ , enquanto o campo magnético  $H$  diminui inversamente proporcional ao cubo de distância, i.e.,  $H \propto \frac{1}{d^3}$ , de acordo com a previsão teórica (Figura 3.3, Secção 3.2.3);

- os núcleos ferromagnéticos têm uma função importante no sistema de TESC, i.e., a de confinar e a de guiar o fluxo magnético;
- dos resultados da Tabela 5.3 se pode inferir que o valor do critério, i.e., o coeficiente de exposição no Caso de Estudo\_1 é de 1.478, sendo significativamente maior que a unidade. Pelo que o valor total do campo elétrico medido em Caso de Estudo\_1 considerando as primeiras 20 harmónicas está acima dos limites de exposição definidos pelo ICNIRP [ICNIRP10] a 47.8%. Como foi mencionado na Secção 3.3.3, o facto de o valor medido dos parâmetros do campo EM ultrapassar o nível de referência não implica necessariamente a exposição excessiva. Nessas circunstâncias será necessário verificar se as restrições básicas são cumpridas;
- o valor total do campo elétrico medido em Caso de Estudo\_2 considerando as primeiras 20 harmónicas conforme os resultados da Tabela 5.3 está abaixo dos limites de exposição definidos pelo ICNIRP [ICNIRP10].

Para reduzir a exposição ao campo elétrico é proposto que sejam consideradas medidas para proteger os seres vivos dos elevados valores do campo elétrico, nomeadamente, a blindagem do sistema Tx/Rx de TESC.

As magnitudes simuladas e experimentais do campo elétrico foram obtidas para o valor de potência aos terminais da carga  $P_{out} = 800$  W. No entanto, no caso dos veículos elétricos, os valores de potência podem variar de 3.3 kW a 22 kW para veículos leves e até 100 kW para veículos pesados. Proporcionalmente, o perigo das emissões de campo elétrico será muito maior na realidade. Assim, a componente elétrica do campo EM produzido pelo sistema de TESC em tais condições poderia se tornar mais significativo. Sendo assim, mais simulações são

necessárias para avaliar devidamente os valores da componente elétrica do campo EM produzido pelo sistema de TESC com valores de potência na ordem de kW.

Apesar de transferência da energia entre o Tx e o Rx é realizada por meio do campo magnético, a componente elétrica do campo EM em Caso de Estudo\_1 revela as magnitudes que ultrapassam em quase 50% os níveis de referência de exposição definidos pela ICNIRP [ICNIRP10], pelo que é necessário verificar se as restrições básicas, nomeadamente, o nível de *SAR*, são cumpridas.

No que se refere à atenuação dos campos EM recorrendo às blindagens por materiais condutivos ou ferromagnéticos, na implementação de um sistema de TESC é necessário levar em consideração vários fatores. Entre estes fatores podem ser nomeados a frequência de interferência EM a ser blindada, propriedades EM dos materiais blindantes e a sua espessura, a distância entre a fonte de interferência e região a ser blindada, geometria de blindagem, i.e., aberta ou fechada [Ott09].

Foi avaliado o desempenho do protótipo implementado para a TESC simultaneamente com TDSF durante os ensaios nas condições de variação de distância e do desalinhamento entre as bobinas Tx e Rx. Os ensaios experimentais demonstraram que o protótipo implementado apresenta um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do desempenho dos sistemas de TESC levavam a prever.

## 5.6 Conclusões

O uso do método dos elementos finitos revelou ser uma ferramenta útil para a determinação dos resultados numéricos dos valores do campo elétrico e do campo magnético irradiados pelo sistema de TESC. Os resultados numéricos ajustam-se com bastante precisão aos os valores medidos dos campos elétricos. Para o Caso de Estudo \_1 o valor total do campo elétrico medido produzido pelo protótipo de TESC está acima dos limites de exposição definidos pelo ICNIRP [ICNIRP10] a 47.8%. O valor total do campo elétrico medido em Caso de Estudo\_2 considerando



as primeiras 20 harmónicas está abaixo dos limites de exposição definidos pelo ICNIRP [ICNIRP10]. A avaliação do desempenho do protótipo experimental implementado para a TESC simultaneamente com TDSF durante os testes permite concluir que o mesmo tem a capacidade de sintonização para o regime de ressonância, o que aumenta o rendimento do sistema.

---

# CAPÍTULO

# 6

---

## Conclusão

*Neste capítulo é apresentada a conclusão deste trabalho sobre o tema da transferência da energia sem contacto no âmbito do estudo de emissões do campo elétrico e do funcionamento do canal de comunicação entre o transmissor e o recetor. Ainda são indicadas linhas de investigação para futuros desenvolvimentos.*

## 6.1 Conclusão

Nos últimos anos, o interesse na TESC, designadamente para o carregamento de baterias de veículos elétricos está em crescimento. A transferência da energia sem contacto por acoplamento indutivo ressonante é considerada a mais adequada para o carregamento de baterias de veículos elétricos. Os sistemas de transferência da energia sem contacto produzem as emissões EM tendo um impacto adverso sobre os seres vivos e sobre o canal de comunicação.

Neste trabalho são estudadas as emissões EM produzidas pelo sistema de TESC com enfoque na componente elétrica do campo eletromagnético que pode afetar de forma adversa os seres vivos que se encontram na vizinhança do sistema, os equipamentos eletrónicos e o canal de comunicação.

É realizado um levantamento bibliográfico de questões relacionadas com desenvolvimento dos sistemas de transferência da energia sem contacto por acoplamento indutivo ressonante. É apresentada uma revisão sobre transferência da energia sem contacto e a transferência de dados sem fios em simultâneo, com enfoque na visão geral sobre os protocolos de comunicação sem fios adequadas para sistemas de TESC, que possam ser utilizadas para melhorar a comunicação entre o Tx e o Rx. É feita uma revisão de diferentes métodos de redução de emissões eletromagnéticas irradiadas pelos sistemas de transferência de energia sem contacto e de avaliação dos campos eletromagnéticos produzidos pelos sistemas. São apresentados os limites e critérios de exposição do corpo humano aos campos EM estabelecidos pelas organizações internacionais.

Neste trabalho são ainda estudadas as emissões da componente elétrica do campo EM do sistema de transferência de energia sem contacto em dois casos de estudo. São criados os modelos em 2D e em 3D e realizadas as modelações de protótipos do Caso de Estudo\_1 e do Caso de Estudo\_2 recorrendo a análise por elementos finitos com recurso à aplicação computacional Comsol Multiphysics. É realizada a simulação computacional dos campos EM produzidos pelos protótipos do Caso

de Estudo\_1 e do Caso de Estudo\_2 funcionando para frequência de 142 kHz e 20 KHz, respetivamente.

Para a validação experimental dos modelos computacionais desenvolvidos são realizadas as medições dos valores do campo elétrico produzido pelos protótipos dos casos de estudo analisados. Os resultados experimentais são comparados com as normas de segurança estabelecidas pelos organismos internacionais para a verificação da compatibilidade eletromagnética. É realizado o teste do desempenho do canal comunicativo entre o Tx e o Rx avaliando o impacto do campo eletromagnético produzido pelo sistema sobre o canal de comunicação.

Pela aplicação do critério de exposição a múltiplas frequências foi verificado que o valor total das primeiras 20 harmónicas do campo elétrico produzido pelo protótipo no Caso de Estudo\_1 está acima dos limites de exposição definidos pelo ICNIRP [ICNIRP10] a 47.8%. O valor total do campo elétrico medido em Caso de Estudo\_2 considerando as primeiras 20 harmónicas está abaixo dos limites de exposição definidos pelo ICNIRP [ICNIRP10]. Os resultados de medição da componente elétrica do campo EM produzido pelo protótipo de transferência da energia sem contacto mostraram a necessidade de aplicação de uma blindagem em torno do sistema Tx/Rx para garantir que os limites de exposição não sejam ultrapassados.

Os resultados obtidos demonstraram a necessidade da realização de estudos baseados em simulação e cálculos numéricos de campos eletromagnéticos produzidos pelo sistema de TESC por um lado, e por outro lado a investigação e análise de processos eletromagnéticos no corpo humano exposto à energia eletromagnética. Estes estudos permitem realmente analisar com precisão a distribuição dos campos eletromagnéticos no corpo humano e avaliar o impacto do sistema de transferência da energia sem contacto nos seres vivos.

A implementação do protótipo experimental do sistema de TESC para a transferência da energia simultaneamente com a transmissão de dados foi realizada para a validação experimental dos resultados da investigação. Para a realização

deste objetivo não só é implementado o protótipo experimental para a TESC, mas também é implementado o canal de comunicação entre o Tx e o Rx recorrendo ao uso de MCs e desenvolvida a aplicação computacional para coordenação do funcionamento do sistema. O propósito da aplicação computacional desenvolvida é a sintonização do protótipo experimental para o regime de ressonância. O sistema de comunicação implementado e a aplicação computacional desenvolvida possibilitam a compensação das eventuais variações de distância e de desalinhamentos entre as bobinas Tx e Rx. A avaliação do desempenho do protótipo experimental revelou a capacidade de sintonização do sistema implementado para o regime de ressonância nas condições de variação de distância e de desalinhamentos entre as bobinas Tx e Rx, incrementando o rendimento do sistema.

## **6.2 Linhas de Investigação Futura**

As linhas de investigação para futuros desenvolvimentos são seguintes:

- L1. desenvolvimento do protótipo de TESC com transmissão de energia e de dados ambos bidirecionais para valores de potência da ordem de kW com outras configurações de bobinas de forma poder carregar ou descarregar uma bateria real;
- L2. simulação e estudo experimental da distribuição da componente magnética do campo EM para completar o estudo das emissões EM produzidas pelos sistemas de TESC estudados;
- L3. desenvolvimento do modelo e simulação computacional para a investigação e análise de distribuição dos campos EM nos seres vivos expostos às emissões EM produzidas pelo protótipo de transferência da energia sem contacto.

# Referências Bibliográficas

- [Agarwal15] Agarwal, A., Gupta, A., Sen, D. "Wireless power using magnetic conductor", International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, Vol. 2, May 2015.
- [AFA16] AirFuel Alliance, Website <http://airfuel.org> (acessado em outubro de 2016).
- [Ahn10] Ahn, S., Pak, J., Song, T., Lee, H., Byun, J.-G., Kang, D., Choi, C.-S., Kim, E., Ryu, J., Kim, M., Cha, Y., Chun, Y., Rim, C.-T., Yim, J.-H., Cho, D.-H., Kim, J., "Low frequency electromagnetic field reduction techniques for the on-line electric vehicle (OLEV)", The IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2010, pp. 625–630, Fort Lauderdale, USA.
- [ANACOM07] Regulamento n.º 86/2007 de ICP-ANACOM, *Procedimentos de monitorização e medição dos níveis de intensidade dos campos electromagnéticos com origem em estações de radiocomunicações*, Diário da República, 2.ª série – N.º 98 - 22 de Maio de 2007.
- [APA14] Relatório do Estado do Ambiente 2014, Agência Portuguesa do Ambiente, dezembro de 2014.
- [APA15] Agência Portuguesa do Ambiente, *Emissões Atmosféricas e Qualidade do Ar Ambiente: Enquadramento e Diagnóstico*, março de 2015.
- [Azevedo03] Azevedo, A.F., "Método dos Elementos Finitos", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1ª Edição, 2003.

- [Babat47] Babat, G.I., "Electrodeless discharges and some allied problems", Journal of the Institution of Electrical Engineers – Part III: Radio and Communication Engineering, Vol. 94, pp. 27-37, 1947
- [Baikova16a] Baikova, E.N., Valtchev, S.S., Melicio, R., F. Pires, V., "Electromagnetic interference impact of wireless power transfer system on data wireless channel", in Technological Innovation for CyberPhysical Systems, Eds. L.M. Camarinha-Matos et al., SPRINGER, Heidelberg, Germany, 2016, pp. 293–301.
- [Baikova16b] Baikova, E.N., Valtchev, S.S., Melicio, R., F. Pires, V., "Electromagnetic interference from a wireless power transfer system: experimental results", Renewable Energy and Power Quality Journal, Vol. 1, N. 14, pp. 1020–1024, May 2016.
- [Baikova16c] Baikova, E.N., Valtchev, S.S., Melicio, R., F. Pires, V., "Wireless power transfer impact on data channel", The Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2016, pp. 582–587, Capri, Italy.
- [Baikova16d] Baikova, E.N., Valtchev, S.S., Melicio, R., F. Pires, V., Krusteva, A., Gigov, G., "Study on electromagnetic emissions from wireless energy transfer", *Proc. of IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, pp. 492-497, Varna, Bulgaria, September 2016.



- [Baikova16e] Baikova, E.N., Valtchev, S.S., Melicio, R., Krusteva, A., F. Pires, V., "Study of the Electromagnetic Interference Generated by Wireless Power Transfer Systems", *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 11, No. 5, pp. 526-534, November 2016.
- [Baikova16f] Baikova, E.N., Romba, L.F., Valtchev, S.S., Melício, R., Fernão Pires, V., "Electromagnetic Emissions from Wireless Power Transfer System", Conference on Electronics, Telecommunications and Computers, 6th – 7th December 2016, Lisbon, Portugal.
- [Baikova17a] E. N. Baikova, L. Romba, S. S. Valtchev, R. Melicio, V. Fernão Pires, A. Krusteva, G. Gigov, "Electromagnetic field generated by a wireless energy transfer system: comparison of simulation to measurement", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 32, No. 5, pp. 554–571, November 2017.
- [Baikova17b] Baikova, E.N., Romba, L., Valtchev, S.S., Melício, R., Fernão Pires, V., "Electromagnetic influence of WPT on human's health: Modelling, Simulation and Measurement", Capítulo in: *Emerging Capabilities and Applications of Wireless Power Transfer*, IGI Global, Hershey, November 2017.
- [Baikova18] Baikova, E.N., Romba, L., Melício, R., Valtchev, S.S., "Simulation and Experiment on Electric Field Emissions Generated by Wireless Energy Transfer", The 9th Advanced Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems (DoCEIS' 2018), May 02 - 04, 2018, Monte de Caparica.

- [Baikova19] Baikova, E.N., Romba, L., Valtchev, S.S., Melício, R., Fernão Pires, V. "Electromagnetic influence of WPT on human's health: modelling, simulation and measurement", in *Emerging Capabilities and Applications of Wireless Power Transfer*, IGI Global, Hershey, Pennsylvania, USA, pp. 141–161, 2019.
- [Balanis05] Balanis, C.A., "Antenna theory analysis and design", Textbook, John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2006.
- [Bastos03] Bastos, J.P.A.; Sadowski, N., "Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods", New York: Marcel Dekker, 2003.
- [Batista12a] Batista, N.C., Melício, R., Matias, J.C.O, Catalão, J.P.S., "ZigBee standard in the creation of wireless networks for advanced metering infrastructures", *Proc. of the 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2012)*, pp. 220–223, Medina Yasmine Hammamet, Tunisia, 2012.
- [Batista12b] Batista, N.C., Melício, R., Matias, J.C.O, Catalão, J.P.S., "ZigBee wireless area network for home automation and energy management: field trials and installation approaches", *Proceedings of the 3rd IEEE PES Europe Conference on Innovative Smart Grid Technologies — ISGT 2012*, pp. 1–5, Berlin, Germany, 14–17 October 2012.
- [Batista13] Batista, N.C., Melício, R., Matias, J.C.O, Catalão, J.P.S., "Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building energy management using ZigBee devices within a smart grid", *Energy (ELSEVIER)*, Vol. 49, No. 1, pp. 306–315, 2013.

- [Batista14] Batista, N.C., Melício, R., Mendes, V.M.F., "Layered smart grid architecture approach and field tests by ZigBee technology", *Energy Conversion and Management* (ELSEVIER), Vol. 88, pp. 49–59, 2014.
- [Batista17] Batista, N.C., Melício, R., Mendes, V.M.F., "Services enabler architecture for smart grid and smart living services providers under industry 4.0", *Energy and Buildings* (ELSEVIER), Vol. 141, pp. 16–27, 2017.
- [Beh10a] Beh, T.C., Imura, T., Kato, M., and Hori, Y., "Basic study of improving efficiency of wireless power transfer via magnetic resonance coupling based on impedance matching", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, pp. 2011 - 2016, 2010.
- [Beh10b] Beh, T.C., Kato, M., Imura, T., Hori, Y., "Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonant Coupling at Fixed Resonance Frequency - Power Transfer System Based on Impedance Matching", *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 4, pp. 744–753, 2010.
- [Beh13] Beh, T.C., Kato, M., Imura, T., Oh, S., Hori, Y., "Automated Impedance Matching System for Robust Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 60, pp. 3689–3698, 2013.
- [Bieler02] Bieler, T., Perrottet, M., Nguyen, V., Perriard, Y., "Contactless power and information transmission", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 5, pp. 1266–1272, 2002.
- [Bluetooth16] Specification of the Bluetooth System - Core System Package, Vol. 6, Version 5.0, 2016.

- [Boys02] Boys, J. T., Covic, G., Green, A., "Stability and control of inductively coupled power transfer systems", IEE Proceed. Electric Power Applications, vol. 147, n. 1, 2002, pp. 37-43, 2002.
- [Bienkowski12] Bienkowski, P., Trzaska, H., "Electromagnetic measurements in the near field", Published by SciTech Publishing, Inc., 2012.
- [Bosshard14] Bosshard, R., Kolar, J.W. and Wunsch, B., "Accurate finite-element modeling and experimental verification of inductive power transfer coil design", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Texas, USA, 2014.
- [Brown84] Brown, W., "The History of Power Transmission by Radio Waves", IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-32, No. 9, 1984.
- [Brusamarello13] Brusamarello, V., Blauth, Y.B., Azambuja, R., Muller, I., Sousa, F.R., "Power transfer with an inductive link and wireless tuning", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 62, No. 5, pp. 924–931, 2013.
- [Campi16] Campi, T.; Cruciani, S., Palandrani, F., Santis, V., Hirata, A., Feliziani, M., "Wireless Power Transfer Charging System for AIMDs and Pacemakers", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 64, No 2, pp. 633–642, 2016.
- [Cannon09] Cannon, B.L., Hoburg, J.F., Stancil, D.D., Goldstein, S.C., "Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, n. 7, p. 1819–1825, 2009.

- [Cardoso16] Cardoso, J.R., "Electromagnetics through the Finite Element Method", Ed. Taylor & Francis, 2016.
- [Chang14] Chang, R., Quan, L., Zhu, X., Zong, Z., Zhou, H. "Design of a wireless power transfer system for EV application based on finite element analysis and MATLAB simulation", Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, China, 2014.
- [Chawla12] N. Chawla, S. Tosunoglu, "State of the art in Inductive charging for electronic appliances and its future in transportation", Florida Conference on Recent Advances in Robotics, pp 1-7, Boca Raton, Florida, May 10-11, 2012.
- [Chen10] Chen, C.-J., Chu, Tah-H., Lin, C.-L., Jou, Z.-C., "A study of loosely coupled coils for wireless power transfer", *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs* 2010, 57, 536–540.
- [Cheon11] S. Cheon, Y.-H. Kim, K. Seung-Youl, M.L. Lee, J.-M. Lee and T. Zyung, "Circuit-model-based analysis of a wireless energy-transfer system via coupled magnetic resonances", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, No. 7, pp. 2906–2914, 2011.
- [Chopra12] Chopra, S., Prasanth, V., Mansouri, B.E., Bauer, P., "A contactless power transfer - supercapacitor based system for EV application", 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2012), Montreal, QC, Canada, 2012.

- [Christ13] Christ, A., Douglas, M. G., Roman, J. M., Cooper, E. B., P. Sample, A., Waters, B. H., Smith, J. R., Kuster, N., "Evaluation of wireless resonant power transfer systems with human electromagnetic exposure limits", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 55, Issue: 2 pp. 265 - 274, 2013.
- [CISPR15] CISPR 11:2015, *Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement*, 2015.
- [Colotti06] Colotti, J., "EMC design fundamentals", *IEEE Conference on Systems, Applications and Technology, LISAT 2006*, Long Island, 2006.
- [COMSOL12] COMSOL Multiphysics User's Guide, version 4.3, May 2012.
- [Cruciani13] Cruciani S., Feliziani, M., "Mitigation of the magnetic field generated by a wireless power transfer (WPT) system without reducing the WPT efficiency", *EMC Europe –Int. Symposium on EMC*, Bruges, Belgium, Sept. 2-6, 2013.
- [Ding14] Ding, P.-P., Bernard, L., Pichon, L., Razek, A., "Evaluation of electromagnetic fields in human body exposed to wireless inductive charging system", *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 50, No.2, Feb. 2014.
- [EC99] European Communities, *Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) (1999/519/EC)*, Official Journal of the European Communities (OJEC), No. L 199, pp. 59–70, July 1999.
- [ESnet15] ESnet: <https://fasterdata.es.net/performance-testing/network-troubleshooting-tools/iperf-and-iperf3/>, 2015.

- [ETSI15] ETSI EN 300 330-1: *Electromagnetic compatibility and radio spectrum matters (ERM); short range devices (SRD); Radio equipment in the frequency range 9 kHz to 25 MHz and inductive loop systems in the frequency range 9 kHz to 30 MHz; Part 1: technical characteristics and test methods*, 2015.
- [ETSI16] ETSI TR 103 409: *System reference document (SRdoc); wireless power transmission (WPT) systems for electric vehicles (EV) operating in the frequency band 79 - 90 kHz*, Technical Report, 2016.
- [Feliziani13] Feliziani, M., Cruciani, S., "Mitigation of the magnetic field generated by a wireless power transfer (WPT) system without reducing the WPTefficiency", *EMC Europe –Int. Symposium on EMC*, Bruges, Belgium, Sept. 2-6, 2013.
- [Fornazier12] Fornazier, H., Martin, A., Messner, S., "Wireless communication: Wi-Fi, Bluetooth, IEEE 802.15.4, DASH7", [electronic resource] URL: <http://rose.eu.org/2012/?s=Wireless-communication>.
- [Gao15] Y. Gao, K. B. Farley, A. Ginart, and Z. T. H. Tse, "Safety and efficiency of the wireless charging of electric vehicles", *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 230, No. 9, pp. 1196-1207, 2015.
- [Gendron17] Gendron, M., Hazel, B., Boudreault, E., Champliand, H., Pham, X.-T., "Modeling circular inductors coupled to a semi-infinite magnetic medium considering the proximity effect", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 31, No. 13, pp. 1232-1254, July 2017.

- [Gherardini14] Gherardini, L., Ciuti, G., Tognarelli, S., Cinti, C., "Searching for the perfect wave: the effect of radiofrequency electromagnetic fields on cells", *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 15, No. 4, pp. 5366-5387, 2014.
- [Green12] Green, R.J., Rihawi, Z., Mutalip, Z.A., Leeson, M.S., "Networks in automotive systems: The potential for optical wireless integration", *14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2012.
- [Haus84] Haus, H.A., *Waves and fields in optoelectronics*, Prentice-Hall, New Jersey, 1984.
- [Hmida07] Hmida, G.B., Ghairani, H., Samet, M., "Design of a wireless power and data transmission circuits for implantable biomicrosystem", *Biotechnology*, Vol. 6, No 2, pp. 153–164, 2007.
- [Hoang12] Hoang, H., Bien, F., *Maximizing efficiency of electromagnetic resonance wireless power transmission systems with adaptive circuits*, *Wireless power transfer - principles and engineering explorations*, K. Y. Kim (Ed.), InTech Publisher, January 2012.
- [Hu14] Hu, W., Zhou, H., Deng, Q., Gao, X., "Optimization algorithm and practical implementation for 2-coil wireless power transfer systems", *American Control Conference (ACC)*, Portland, Oregon, USA, 2014.
- [Huertas09] Huertas, J. I., Barraza, R., Echeverry, J. M., "Wireless data transmission from inside electromagnetic fields", *6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control*, CCE, 2009.



- [IARC13] International Agency for Research on Cancer (IARC), *Non-ionizing radiation, part 2: radiofrequency electromagnetic fields*, IARC Monograph, Vol. 102, Lyon, France, 2013.
- [ICNIRP98] ICNIRP, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, Health Phys., vol. 74(4), 1998.
- [ICNIRP09] ICNIRP, *Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)*, Review of the Scientific Evidence and Health Consequences. Munich: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2009.
- [ICNIRP10] ICNIRP, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz)*, Health Phys., vol. 99, pp. 818–836, 2010.
- [Ida97] Ida, N., Bastos, J. P. A., *Electromagnetics and calculation of field*, 2. Ed. New York: Springer, 1997.
- [IEEE05] IEEE Std C95.1-2005, *Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz*, International Committee on Electromagnetic Safety, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, 2005.
- [IEEE05-802.15.1] 802.15.1-2005 - IEEE Standard for Information technology- Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 15.1a: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN), 2005.
- [Imura09a] Imura, T., Okabe H., Hori, Y., "Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for electric

- vehicles by using magnetic resonant couplings", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009.
- [Imura09b] Imura, T., Uchida, T., Hori, Y., "Flexibility of contactless power transfer using magnetic resonance coupling to air gap and misalignment for EV", *World Electric Vehicle Journal* Vol. 3 - ISSN 2032-6653, 2009.
- [Imura10] Imura, T., "Study on maximum air-gap and efficiency of magnetic resonant coupling for wireless power transfer using equivalent circuit", *Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium on*, pp. 3664–3669, 2010
- [Isaev16] Isaev, Y.N., Vasileva, O.V., Budko, A.A. and Lefebvre, S. "Parameters assessment of the inductively-coupled circuit for wireless power transfer", *Int. Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*, Tomsk, Rússia, 2016.
- [Ishihara14] Ishihara, H., Moritsuka, F., Kudo, H., Obayashi, S., Itakura, T., Matsushita, A., Mochikawa, H., Otaka, S. "A voltage ratio-based efficiency control method for 3 kW wireless power transmission", *Proc. The 29th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1312–1316, 2014.
- [ITU17] ITU-R SM.2303-2: *Wireless power transmission using technologies other than radio frequency beam*, Report, Electronic Publication, Geneva, 2017
- [Jang12] Jang, Y.J., Ko, Y.D., Jeong, S., "Optimal design of the wireless charging electric vehicle", *Proc. of IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, pp. 1–5, Mar. 2012.

- [Jianyu13] Jianyu, L., Houjun, T., Xin, G., "Frequency splitting analysis of wireless power transfer system based on T-type transformer model", *Electronics & Electrical Engineering*, Vol. 19, No. 10, pp. 109-113, 2013.
- [Jin10] Jin, J.-M., *Theory and computation of electromagnetic fields*, John Wiley & Sons, 2010.
- [Jinghe14] Jinghe, Z., Yanjie G., Chenglin, L., "FEM simulation and experiment of a novel shielding structure of wireless power transfer", *Transportation Electrification Asia-Pacific 2014 IEEE Conference*.
- [Jolani13] Jolani, F., Mehta, J., Yu, Y., Chen, Z.D., "Design of wireless power transfer systems using magnetic resonance coupling for implantable medical devices", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 40, pp 141-151, 2013.
- [Jorgetto15] Jorgetto, M.F.C., Guilherme de A. e Melo, Canesin, C.A., "Wireless inductive power transfer, oriented modeling and design", *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2015.
- [Kalialakis14] Kalialakis, C., Georgiadis, A., "The regulatory framework for wireless power transfer systems", *Cambridge Wireless Power Transfer*, Vol. 1, No. 2, pp. 108-118, September 2014.
- [Kalialakis16] Kalialakis, C., Carvalho, N.B., Shinohara, N., Georgiadis, A., "Selected developments in wireless power transfer standards and regulations", *IEEE Communications Magazine — Communications Standards Supplement*, July 2016.

- [Kar14] Kar, D.P., Nayak, P.P., Bhuyan, S., Panda, S.K. " Automatic frequency tuning wireless charging system for enhancement of efficiency", *Electronics Letters*, Vol. 50, No. 24, pp. 11–20, 2014.
- [Karalis08] Karalis, A., Joannopoulos, J.D., Soljačić, M., "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Annals of Physics*, vol. 323, No. 1, pp 34–48, 2008.
- [Ke14] Ke, L., Yan, G., Yan, S., Wang, Z., Liu, D., "Improvement of the coupling factor of litz-wire coil pair with ferrite substrate for transcutaneous energy transfer system", *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 39, pp. 41–52, 2014.
- [Kim10] Kim, J.-W., Son, H.-C., Kim, D.-H., Kim, K.-H., Park, Y.-J., "Analysis of wireless energy transfer to multiple devices using CMT", *In Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, pp. 2149–2152, Yokohama, Japan, 2010.
- [Kim11] Kim, J.-W., Son, H.-C., Kim K.-H., Park, Y.-J., "Efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with intermediate resonant coil", *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, Vol. 10, No., pp.389-392, 2011.
- [Kim13a] Kim, J., Kim, J., Kong, S., Kim, H., Suh, I.-S., Suh, N.P., Cho, D.-H., Kim J., Ahn, S., "Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system", *Proc. IEEE*, Vol. 101, No. 6, pp. 1332–1342, 2013.
- [Kim13b] Kim, S.-H., Lim, Y.-S., Lee, S.-J., "Magnetic resonant coupling based wireless power transfer system with in-band communication", *Journal of semiconductor technology and science*, Vol. 13, No. 6, December, 2013

- [Kim14a] Kim, J., Kim, H., Song, C., Kim, I.-M., "Electromagnetic interference and radiation from wireless power transfer systems", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, 2014.
- [Kim14b] Kim, M., Kim, S., Chun, Y., Park, S., Ahn, S., "Low frequency electromagnetic compatibility of wirelessly powered electric vehicles", *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, 2014.
- [Kim14c] Kim, S., Park, H.-H., Kim, J., Kim, K. and Ahn, S. "Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 62, No. 4, pp. 1057–1066, April 2014.
- [Kline11] Kline, M., Izyumin, I., Boser, B., Sanders, S., "Capacitive power transfer for contactless charging", *The IEEE 26th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1398–1404, Fort Worth, USA, 2011.
- [Koizumi12] Koizumi, M., Komurasaki, K., Mizuno, Y., Arakawa, Y., "Wireless power feeding with strongly coupled magnetic resonance for a flying object", *Wireless Engineering and Technology*, Vol. 3, pp. 86-89, 2012.
- [Kong14] Kong, S., Bae, B., Kim, J.J., Kim, S., Jung, D.H., Kim, J., "Electromagnetic radiated emissions from a repeating-coil wireless power transfer system using a resonant magnetic field coupling", *Wireless Power Transfer Conference (WPTC) IEEE*, pp. 138-141, May 2014.

- [Kong15] Kong, S., Bae, B., Jung, D.H., Kim, J.J., "An investigation of electromagnetic radiated emission and interference from multi-coil wireless power transfer systems using resonant magnetic field coupling", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 63, No. 3, pp. 833- 846, 2015.
- [Kosatsky13] Kosatsky, T., Zitouni, A., Shum, M., Ward, H.D., Gallagher, R.P., Anselmo, F., Ross, R., Freeman, L., Oda, J., Lidstone, S., Miu, L., Wiens, M., Phillips, M., Spock, R.P., *Radiofrequency toolkit for environmental health practitioners*, Technical report, Vancouver, BC: BC Centre for Disease Control and National Collaborating Centre for Environmental Health, 2013. (Available: <https://www.emf-portal.org/en/article/26950>).
- [Kurs07] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., Soljačić, M., "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, Vol. 317, No. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [Kurs10] Kurs, A., Moffatt, R., Soljačić, M., "Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices", *Applied Physics Letters*, Vol. 96, No. 4, 2010.
- [Laakso15] Laakso, I., Shimamoto, T., Hirata, A., Feliziani, M., "Quasistatic approximation for exposure assessment of wireless power transfer", *IEICE Trans. on Communications*, Vol. E98.B, No. 7, pp. 1156-1163, 2015.
- [Lamping08] Lamping, U., Sharpe, R., Warnicke, E., "Wireshark user's guide", 2004-2008.

- [Landis97] Landis, G., "A super synchronous solar power", Presented at SPS-97: Space & electric power for humanity, Montreal, Canada, pp. 24-25, 1997.
- [Li15a] Li, H., Li, J., Wang, K., Chen, W., Yang, X., "A Maximum Efficiency Point Tracking Control Scheme for Wireless Power Transfer Systems Using Magnetic Resonant Coupling", *IEEE Trans. Power Electron.* No. 5, pp. 3998–4008, 2015.
- [Li15b] Li, S., Mi, C.C., "Wireless power transfer for electric vehicle applications", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 4–17, 2015.
- [Lin13] Lin, J. C., "Wireless power transfer for mobile applications, and health effects", *Telecommunications Health and Safety, IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 55, No. 2, pp. 250-253, 2013.
- [Lyu15] Lyu, Y., Meng, F., Yang, G.M., Che, B.J., Wu, Q., Sun, L. D. Erni, J., Li, L.-W., "A method of using nonidentical resonant coils for frequency splitting elimination in wireless power transfer", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 11, Nov. 2015.
- [Mahajan12] Mahajan, A., Singh, M., "Human health and electromagnetic radiations", *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, Vol. 1, No. 6, 2012.
- [Maier17] Maier, A., Sharp, A., Vagapov, Y., "Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things", *The Internet Technologies and Applications Conference (ITA)*, Wrexham, UK, 2017.

- [Matsuzaki12] Matsuzaki, M., *Reliability and stability of field wireless*, Yokogawa Technical Report, English Edition, Vol. 55, No. 2, pp. 15–18, 2012.
- [Medeiros11] Medeiros, R., *Transmissão de energia sem contacto com aplicação em veículos eléctricos*, Tese de Mestrado, FCT, Universidade Nova, Lisboa, 2011.
- [Melício10] Melício, M.R., *Modelos dinâmicos de sistemas de conversão de energia eólica ligados à rede elétrica*, Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Portugal, Fevereiro 2010.
- [Miclaus10] Miclaus S., Bechet P., Iftode C., "Near field radiofrequency measurements for occupational exposure assessment by personal exposimeter: possibilities and limitations", *In 6th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Bodrum, Turkey, 2010.
- [Monti18] Monti, G., Masotti, D., Paolini, G., Corchia, L., Costanzo, A., Dionigi, M., Mastri, F., Mongiardo, M., Sorrentino, R., Tarricone, L., "EMC and EMI issues of WPT systems for wearable and implantable devices", *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, Vol. 7, No. 1, 2018.
- [Mude16] Mude, K.N., Bertoluzzo, M., Buja, G., Pinto, R. "Design and experimentation of two-coil coupling for electric city-car WPT charging", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 30, No. 1, pp.70–88, November 2016.
- [Neves11] Neves, A., Sousa, D.M., Roque, A., Terras, J.M., "Analysis of an inductive charging system for a commercial electric vehicle", *Proceedings of the 2011 14th European Conference*



- on Power Electronics and Applications*, Birmingham, UK, 2011.
- [Nguyen15] Nguyen, B.X., Vilathgamuwa, D.M., Foo, G.H.B., Wang, P., Ong, A., Madawala, U.K., Nguyen, T.D., "An Efficiency Optimization Scheme for Bidirectional Inductive Power Transfer Systems", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 11, pp. 6310–6319, 2015.
- [Nolte05] Nolte, T., Hansson, H., Bello, L.L., "Automotive communications - past, current and future", *Proc. 10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'2005*, Catania, Italy, 2005.
- [Obayashi14] Obayashi, S., Tsukahara, H., "EMC issues on wireless power transfer", In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 601–604, Tokyo, Japan, 2014.
- [Oliveira17] Oliveira, M.J.G., *Desenvolvimento de uma plataforma para Internet das Coisas baseada em Wi-Fi*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2017.
- [Ongaro06] Ongaro, F., Summerer, L., "Peter Glaser Lecture: space and a sustainable 21st century energy system", *57th International Astronautical Congress*, Valencia, Spain, 2006.
- [Orfanidis13] Orfanidis, S.J., *Electromagnetic waves and antennas*, Rutgers University, Available online: <http://eceweb1.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>, 2013.
- [Ott09] Ott, H.W., *Electromagnetic compatibility engineering*, Wiley Online Library, 2009.
- [Ozdemir11] Ozdemir, F., Kargi, A. "Electromagnetic waves and human health", *InTechOpen*, Published on 21.06.2011.

- [Ozdemir17] Ozdemir, C., Naci Mete, A., "A Frequency-Tracking Algorithm for Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems", *Proc. 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 2017.
- [Park12] Park, Y., Kim, J., Kim, K.-H., *Magnetically coupled resonance wireless power transfer (MR-WPT) with multiple self-resonators, wireless power transfer – principles and engineering explorations*, Ed. by K. Y. Kim, Chapter 3, January 25, 2012.
- [Park16] Park, S.W., Kim, M., "Numerical exposure assessment method for low frequency range and application to wireless power transfer", *PLoS One*, Vol. 11, Published online Nov. 2016.
- [Peng15] Peng, K., Liu, X., Huang, P., "Study on the wireless energy supply system in the implantable cardiac pacemaker", *Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA)*, Guiyang, China, 2015.
- [Pereirinha11] Pereirinha, P.G., Trovão, J.P., "Standardization in electric vehicles", *XIICLEEE-12th Portuguese – Spanish Conference on Electrical Engineering*, 2011.
- [Pinto17] Pinto, R., Lopresto, V., Genovese, A. "Human exposure to wireless power transfer systems: a numerical dosimetric study", *11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP*, Paris, France, March 2017.
- [Pothuganti14] Pothuganti, K., Chitneni, A, "A Comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi", *Advance in Electronic and Electric Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 655–662, 2014.

- [Qiu14] Qiu, C., Chau, K.T., Ching, T.W., Liu, C., "Overview of wireless charging technologies for electric vehicles", *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. 12 No. 1, pp. 1679–1685, June 2014.
- [Rathge09] Rathge, C., Kuschner, D., "High efficient inductive energy and data transmission system with special coil geometry", *Proc. of 13-th European Conference – Power Electronics and Applications*, pp. 1–8, 2009.
- [Redlarski15] Redlarski, G., Lewczuk, B., Żak, A., Koncicki, A., Krawczuk, M., Piechocki, J., Jakubiuk, K., Tojza, P., Jaworski, J., Ambroziak, D., Skarbek, L., Gradolewski, D., "The influence of electromagnetic pollution on living organisms: historical trends and forecasting changes", *BioMed Research International*, vol. 2015, pp. 1–18, 2015.
- [Rifai14] Rifai, A. B., Hakami, M. A., "Health Hazards of Electromagnetic Radiation", *Journal of Biosciences and Medicines*, Vol. 2, pp. 1-12, Published Online October 2014.
- [Romba16] Romba, L.F., Baikova, E.N., Valtchev, S.S., Melício, R., "Electric vehicle battery charger: wireless power transfer system controlled by magnetic core reactor", *CETC2016 - Conference on Electronics, Telecommunications and Computers*, 6th – 7th December 2016, Lisbon, Portugal.
- [Romba17] Romba, L., Baikova, E.N., Valtchev, S.S., Melicio, R., "Efficiency Improvement in Wireless Power System", Capítulo in: *Emerging Capabilities and Applications of Wireless Power Transfer*, IGI Global, Hershey, Pennsylvania, USA, November, 2017.

- [Romba18] Romba, L., Baikova, E.N., Borges, C., Melício, R., Valtchev, S.S., "Wireless battery charger for ev with circular or planar coils: comparison", *The 9th Advanced Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems (DoCEIS' 2018)*, Monte de Caparica, May 2018.
- [Romba19] Romba, L., Baikova, E.N., Valtchev, S.S., Melício, R. "Efficiency improvement in wireless power system", in *Emerging Capabilities and Applications of Wireless Power Transfer*, IGI Global, Hershey, Pennsylvania, USA, pp. 23–48, 2019.
- [Rueter16] Rueter, D., "Induction coil as a non-contacting ultrasound transmitter and detector: modeling of magnetic fields for improving the performance", *Ultrasonics*, Vol. 65, pp. 200–210, February 2016.
- [Sadiku04] Sadiku, M.N.O, *Elementos de eletromagnetismo*, 3ª edição, Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [Sample09] Sample, A.P., Meyer, D.A., Smith, J.R., "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 2, pp. 544–554, 2009.
- [Sanches10] Sanches, D., *Interferência eletromagnética EMI*, Rio de Janeiro, Interciência, 2010.
- [SCENIHR15] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, *Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)*, Luxembourg: European Commission, pp. 15–48, 2015.

- [Shoki14] Shoki, H., "Trends, technical and regulatory issues, and standardization concerning commercialization of wireless power transfer technologies", *Proc. In Asia-Pacific Microwave Conference*, Nov. 2014.
- [Son13] Son, Y.-H., Jang, B.-J., "Simultaneous data and power transmission in resonant wireless power system", *Proc in Asia-Pacific Microwave Conference*, 2013.
- [Staebler17] Staebler, P., *Human exposure to electromagnetic fields: from extremely low frequency (ELF) to radiofrequency*, John Wiley and Sons, USA, 2017.
- [Stozharov07] Stozharov, A., *Medical ecology*, Textbook (in Russian), Vysshaja Shkola Publishing House, pp.270-302, 2007.
- [Tamura13] Tamura, T., Masuda, I., "Device connectivity technology using short-distance wireless communications", *FUJITSU Scientific & Technical Journal (FSTJ)*, Vol. 49, No. 2, pp. 213-219, April 2013.
- [Teixeira12] Teixeira, A.R.R., *Contributos das políticas de energia para um desenvolvimento sustentável: análises dos casos europeu e português*, Dissertação de Mestrado, Universidade Fernando Pessoa, Portugal, 2012.
- [TI14] *Wireless Connectivity Guide*, Texas Instruments 4Q 2014, Available online.
- [Tibajia11] Tibajia, G.V., Talampas, M.C.R.: "Development and evaluation of simultaneous wireless transmission of power and data for oceanographic devices", *In: IEEE Sensors*, 254–257, Limerick, Ireland, 2011.

- [Tseng13] Tseng, R., Novak, B., Shevde S., Grajski, K. A., "Introduction to the alliance for wireless power loosely-coupled wireless power transfer system specification version 1.0", *IEEE Wireless Power Transfer Conference 2013, Technologies, Systems and Applications*, Perugia, Italy, May 15-16, 2013.
- [Valtchev90] Valtchev, S., Klaassens, J. B., "Efficient resonant power conversion", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IE-37, No. 6, pp. 490–495, 1990.
- [Valtchev09] Stanimir S. Valtchev, "Series resonant power converter for contactless energy transfer with improved efficiency," Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, PhD Thesis, 2009.
- [Vilathgamuwa15] Vilathgamuwa, D.M., Sampath, J.P.K., "Wireless power transfer (WPT) for electric vehicles (EVs)-present and future trends, " in *Plug in Electric Vehicles in Smart Grids*, Heidelberg: Springer, pp. 33–60, 2015.
- [Welsh02] Welsh, E., Murphy P., Frantz, P., "Improving connection times for Bluetooth devices in mobile environments", *International Conference on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences (ICFCS)*, Tokyo, Japan, 2002.
- [Wen17] Wen, F., Huang, X. "Human exposure to electromagnetic fields from parallel wireless power transfer systems", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 14, No. 2, February 2017.

- [Woodings06] Woodings, R. W., Cypress, M.G., "Avoiding Interference in the 2.4-GHz ISM band", 2006, Available online: [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1273359](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273359).
- [Wu12] Wu, C-T. M., Sun, J. S., Itoh, T., "A simple self-powered AM-demodulator for wireless power/data transmission", *Proc. of 42th European Microwave Conference*, pp 325-328, 2012.
- [Xie13] Xie, L., Shi, Y., Hou, Y.T., Lou, A., "Wireless power transfer and applications to sensor networks", *IEEE Wireless Communications*, Vol. 20, No. 4, pp. 140-145, 2013.
- [Yamakawa14] Yamakawa, M., Shimamura, K., Komurasaki, K., Koizumi, H., "Demonstration of Automatic Impedance-Matching and Constant Power Feeding to and Electric Helicopter via Magnetic Resonance Coupling", *Wireless Engineering and Technology*, Vol. 5, pp 45-53, Published Online July 2014 in <http://www.scirp.org/journal/wet>.
- [Yashchenko14] Yashchenko, V.N., Kozlov, D.S., Vendik, I.B., "Dual-mode resonator for the dual-band system of wireless energy transfer with simultaneous data transmission", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 50, pp. 61–66, 2014.
- [Yokoi11] Yokoi, Y., Taniya, A., Horiuchi, M., Kobayashi, S.: "Development of kW class wireless power transmission system for EV using magnetic resonant method", *Proc. 1st International Electric Vehicle Technology Conference*, pp. 1–6, Yokohama, Japan, 2011.

- [Zhang14] Zhang, Y., Zhao, Z., Chen, K., "Frequency decrease analysis of resonant wireless power transfer", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, pp. 1058–1063, 2014.
- [Zhou14] Zhou, H., Zhu, B., Hu, W., Liu, Z., Gao, X., "Modelling and practical implementation of 2-Coil wireless power transfer systems", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2014, pp. 1–8, 2014.
- [Zhu08] Zhu, C., Liu, K., Yu, C., Ma, R., Cheng, H., "Simulation and experimental analysis on wireless energy transfer based on magnetic resonances", *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1–4, Harbin, China, 2008.
- [Zlatanov15] Zlatanov, N., "Channel Multiplexing, Bandwidth, Data Rate and Capacity", *Proc. 11th annual ARM TechCon Conference*, pp. 1–8, Santa Clara, CA, USA, 2015.



# Anexo 1

## Organizações envolvidas na elaboração de normas

Os limites de exposição a campos EM estão baseados nos efeitos biológicos estabelecidos descritos na Secção 3.3.1. Existem organizações a nível internacional, regional e nacional envolvidas na preparação e formulação de recomendações sobre os limites de segurança na exposição a campos EM para os seres humanos. As normas e os limites de segurança na exposição a campos EM são estabelecidos de acordo com estudos científicos e são revistos periodicamente, para garantir que eles atendam aos requisitos científicos atuais [ICNIRP98, IEEE05, ICNIRP10, Kosatsky13].

No que respeita às normas sobre a CEM aplicadas aos sistemas de TESC, existem organizações internacionais, europeias e nacionais que têm estado envolvidas na preparação e elaboração das respetivas recomendações, nomeadamente:

### *IEC - International Electrotechnical Commission*

A Comissão Eletrotécnica Internacional, IEC, é uma organização internacional dedicada à elaboração de normas internacionais para os equipamentos elétricos, eletrónicos e relacionados. Algumas das normas são desenvolvidas em conjunto com a Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization*, ISO). A ISO trata da certificação e desenvolve normas em diferentes campos, exceto elétricos e eletrónicos.

### *CISPR - International Special Committee on Radio Interference*

O Comitê Internacional Especial de Interferências de Rádio, CISPR, é uma organização da IEC que estabelece normas na área da CEM, incluindo instrumentação, medição, limites para distúrbios de rádio e requisitos para imunidade de equipamentos elétricos.

*ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

A Comissão Internacional na Proteção de Radiação Não-Ionizante, ICNIRP, é uma organização internacional independente, formalmente reconhecida pela WHO, Organização Mundial da Saúde. A missão da ICNIRP é a avaliação do conhecimento científico e recentes investigações que possam fornecer orientação de proteção sobre radiações não ionizantes. Os limites de exposição a campos EM mais amplamente adotados em todo o mundo são as recomendações especificadas pela ICNIRP. Essas recomendações consistem das publicações de 1998 (0 Hz – 300 GHz) [ICNIRP98] e de 2010 (0 Hz – 100 kHz) [ICNIRP10].

*IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers*

O IEEE é uma organização internacional de especialistas em tecnologia, líder global no desenvolvimento de normas para a eletrônica, sistemas elétricos e *hardware* de computadores e redes. A sociedade de *CEM Society* é uma das aproximadamente 40 sociedades técnicas que operam sob a égide do IEEE.

*ITU - International Telecommunication Union*

O ITU é uma das mais respeitadas organizações de normalização no domínio das telecomunicações a nível mundial, que está a trabalhar no domínio do espectro de radiofrequências e desenvolve e coordena as normas técnicas mundiais.

*ETSI - European Telecommunications Standards Institute*

A ETSI é o Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações, nomeadamente, é a organização europeia sobre normalização, que tem por missão a produção de normas europeias nas telecomunicações e desenvolve atividades de pré-normalização e normalização nas áreas das tecnologias da informação e da radiodifusão televisiva e sonora.

*CEN - Comité Européen de Normalisation*

O CEN é o Comité Europeu de Normalização, nomeadamente, a organização de normas públicas que desenvolve e publica as normas de outras áreas técnicas que não é área de telecomunicações.

*CENELEC - European Committee for Electrotechnical Standardization*

O CENELEC é o Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica que prepara e publica normas europeias no domínio da eletrotecnia. Em cooperação com ETSI, e com CEN constitui o sistema europeu de regulação técnica e normalização. As normas destes estabelecimentos são regularmente adotadas em muitos países fora da Europa que seguem normas técnicas europeias.

*SAE International*

A SAE International, *Society of Automotive Engineers*, é uma organização profissional de engenheiros e técnicos especializada nas indústrias aeroespacial, automotiva e de veículos comerciais fundada nos Estados Unidos de América em 1905. O principal objetivo da associação é o desenvolvimento de normas para todos os tipos de veículos [Pereirinha11].

*ANACOM*

A ANACOM é Autoridade Nacional de Comunicações de Portugal e desde 2002 tem a designação de Instituto das Comunicações de Portugal. A ANACOM desenvolve atividade de regulação, supervisão e representação do sector das comunicações.

É importante que todos os equipamentos e sistemas de TESC sejam aprovados mediante rigorosos ensaios laboratoriais de CEM considerando as normas desenvolvidas pelas organizações mencionadas anteriormente.

## Anexo 2

### Introdução ao Método dos Elementos Finitos

Neste anexo é apresentada uma breve abordagem ao método de elementos finitos, FEM. O FEM é um método numérico que permite resolver equações diferenciais parciais. O FEM permite solucionar sistemas complexos ou geometricamente irregulares presentes na física ou na engenharia, enquanto que a solução analítica é mais utilizada para a solução de sistemas simples [Cardoso16].

O FEM está fundamentado na obtenção de uma formulação por meio da discretização dos sistemas estudados e implementação dos mesmos em aplicações computacionais. Conforme o método o sistema global é considerado como sendo equivalente a um agrupamento de elementos finitos, onde cada um elemento apresenta uma estrutura contínua mais simples.

A ideia principal do FEM consiste em dividir um domínio de integração de uma estrutura ou sistema estudado num conjunto de pequenas regiões, denominada de elementos finitos. Assim, o domínio contínuo é transformado para discreto. O resultado da discretização é uma malha ou "*mesh*", que representa o conjunto de elementos finitos. A malha é formada de elementos compostos de faces e de nós, que representam pontos de intersecção e de ligação entre os elementos. O exemplo de uma malha bidimensional com nós e elementos finitos é apresentado na Figura A2.1.

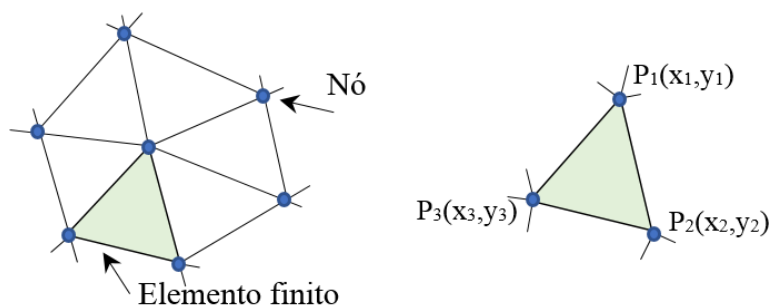


Figura A2.1 – Exemplo de uma malha com nós e elementos finitos.

Na Figura A2.1 é utilizado o modelo bidimensional, sendo que os elementos finitos podem ser triângulos, quadriláteros ou retângulos. Esses elementos são descritos por equações diferenciais parciais e resolvidos por modelos matemáticos para obter as variáveis no interior de cada elemento. As variáveis podem estar associadas a tensões, temperaturas, pressão, forças internas, etc. e dependem da formulação do elemento usado. Em regra, o método de elementos finitos é utilizado seguindo o seguinte procedimento de três etapas [Azevedo03]:

*Pré-processamento:* esta etapa consiste na escolha de um modelo matemático, i.e., equações que descrevem um processo ou fenómeno em questão. Definido o modelo procede-se à criação ou importação da geometria do objeto ou área em estudo. Nesta etapa é construído o modelo unidimensional (1D), bidimensional (2D) ou tridimensional (3D). Após a definição da geometria são determinadas as propriedades físicas, as condições de fronteira e é criada e editada uma malha.

*Processamento:* esta etapa requer os cálculos que envolvem as equações algébricas lineares, as quais podem ser resolvidas de forma numérica. Assim, com o modelo de elementos finitos provido pelo pré-processador, o processador computa os valores de variáveis em questão, que são a solução nos nós da malha.

*Pós-processamento:* esta etapa está destinada à sistematização dos resultados obtidos por meio do FEM. Nesta etapa, podem ser extraídas grandezas derivadas dos resultados obtidos na etapa anterior.

## Anexo 3

### Modelação Eletromagnética

Nesta secção são apresentadas as equações fundamentais do eletromagnetismo usadas neste trabalho. As equações do Maxwell formam a base da teoria do eletromagnetismo e descrevem todos os fenómenos eletromagnéticos clássicos [Orfanidis13]. As quatro grandezas vetoriais que caracterizam o campo EM estão em função do tempo e do espaço, nomeadamente, o campo elétrico  $\mathbf{E}$  [V/m]; o campo magnético  $\mathbf{H}$  [A/m]; a indução magnética  $\mathbf{B}$  [T]; a indução elétrica  $\mathbf{D}$  [C/m<sup>2</sup>]. Assim, a lei da indução de Faraday [Orfanidis13] é dada por:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

A lei da Ampere é dada por:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{A.2})$$

A lei de Gauss para o campo elétrico é dada por:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{A.3})$$

A lei de Gauss para o campo magnético é dada por:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{A.4})$$

sendo  $\mathbf{J}$  a densidade de corrente [A/m<sup>2</sup>],  $\rho$  a densidade volumétrica de cargas elétrica [C/m<sup>3</sup>],  $t$  o tempo [s].

Para o vácuo ou em meios lineares, isotrópicos e homogêneos existem ainda as seguintes relações entre  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{E}$ , respetivamente, dadas por:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{A.7})$$

sendo  $\mu_0$  a permeabilidade do vácuo,  $\mu_r$  a permeabilidade relativa do meio,  $\epsilon_0$  a permitividade elétrica do meio,  $\epsilon_r$  a permitividade relativa do meio,  $\sigma$  a condutividade elétrica do meio.

A equação da continuidade é dada por:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{A.8})$$

### Regime quase-estacionário

As equações de Maxwell (A.1) a (A.4) representam um conjunto de equações diferenciais parciais em quatro dimensões, nomeadamente, três dimensões espaciais e uma no tempo. A sua complexidade pode ser diminuída, reduzindo o número de dimensões. É o caso dos campos variáveis no tempo, oscilando a uma única frequência, então a variável temporal pode ser eliminada, passando assim, para três variáveis espaciais [Jin10]. Considerando os campos com variação temporal sinusoidal, as derivadas em ordem ao tempo  $\partial t$  podem ser substituídas por  $j\omega$ , assim, as equações de Maxwell no domínio de frequência são dadas por:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (\text{A.9})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} \quad (\text{A.10})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{A.11})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{A.12})$$

No domínio da frequência os campos  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{B}$  são vetores complexos, i.e., apenas função das coordenadas espaciais  $x, y, z$  [Ida97].

A densidade do fluxo magnético  $\mathbf{B}$  em termos do potencial vetor magnético  $\mathbf{A}$  é dado por:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{A.13})$$

Nos sistemas de TESC estudados, o tempo de atraso da propagação da onda eletromagnética entre o Tx e o Rx é dado por:

$$t = \frac{\Delta}{c} \quad (\text{A.14})$$

sendo  $\Delta$  a distância entre as bobinas Tx e Rx,  $c$  a velocidade de propagação das ondas EM.

Neste trabalho, foi considerado que o sistema de TESC está a funcionar em regime quase-estacionário. O tempo de propagação da onda eletromagnética  $t$  é menor que o período  $T$ , i.e.,  $t \ll T$ , pelo que o atraso de propagação das ondas EM e o termo referente à densidade de corrente de deslocamento  $\partial \mathbf{D} / \partial t$  pode ser desprezado a quando da determinação dos campos [Ida97, Bastos03, Cardoso16], não tendo um efeito notável até às frequências na ordem dos MHz [Ida97]. Na Tabela A3.1 é apresentado o tempo de propagação da onda eletromagnética (Capítulo 5) no Caso de Estudo\_ 1 e no Caso de Estudo\_ 2.

Tabela A3.1 – Tempo de propagação da onda eletromagnética

Casos de Estudo	Distância entre Tx e Rx $\Delta$ (mm)	Frequência de funcionamento do sistema de TESC, $f$ (kHz)	Período, $T$ (s)	Atraso de propagação da onda EM, $t$ (s)
Caso de Estudo_ 1	40	20	$5 \times 10^{-5}$	$1.33 \times 10^{-11}$
Caso de Estudo_ 2	40 - 80	142	$7.04 \times 10^{-6}$	$1.33 \times 10^{-10}$ - $2.66 \times 10^{-10}$

Num condutor imerso no campo magnético variável podem existir as duas componentes da densidade de corrente, nomeadamente, a densidade de corrente aplicada ao circuito magnético a partir de uma fonte externa  $\mathbf{J}_f$ , e a densidade de corrente induzida no meio condutor devido à variação do fluxo magnético que atravessa o próprio condutor  $\mathbf{J}_{ind}$ .



Para formulação do problema com o potencial vetor magnético num sistema de TESC a funcionar no regime quase-estacionário, as equações de Maxwell e as equações constitutivas dos meios são dados por:

$$\nabla \times \mathbf{E}_{ind} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{A.15})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (\text{A.16})$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \mathbf{B} \quad (\text{A.17})$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{A.18})$$

Sendo a expressão final utilizada neste trabalho dada por:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \mathbf{A} \right) + j\omega\sigma\mathbf{A} = \mathbf{J}_f \quad (\text{A.19})$$

A (A.19) é a representação geral da determinação do campo eletromagnético do sistema de TESC a ser resolvida recorrendo ao FEM.

Considerando (A.19) é determinado o potencial vetor magnético  $\mathbf{A}$  e as quantidades de campo  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{E}$  são obtidas da solução conforme (A.18) e (A.15), respetivamente.

Para simulação em 2D o domínio da solução foi discretizado em elementos finitos de forma triangular. Como os elementos triangulares são elementos de 1ª ordem, o potencial magnético  $\mathbf{A}$  varia linearmente dentro de cada um triângulo. Assim, o vetor potencial magnético é calculado nos vértices dos elementos triangulares em regime quase estacionário. Baseando nos resultados de cálculos do vetor potencial magnético, outras grandezas de interesse, nomeadamente, a densidade de fluxo magnético, intensidade do campo elétrico, densidade de corrente podem ser calculadas.

As equações de Maxwell são válidas nas áreas de domínio onde as características físicas dos materiais ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ) são contínuos [Bastos03, Jin10]. Na fronteira entre

materiais com diferentes características físicas, os campos eletromagnéticos sofrem descontinuidades. Sendo assim, na fronteira de separação entre os dois meios devem ser definidas condições de fronteira [Bastos03, Sadiku04]. As condições de fronteira (também conhecidas como "condições de contorno") determinam os valores iniciais dos campos ou do potencial elétrico ou magnético ao longo da fronteira que delimita o domínio do problema. No eletromagnetismo ocorrem os dois tipos mais comuns de condições de fronteira, nomeadamente, as condições de fronteira de Dirichlet e de Neumann [Bastos03, Sadiku04].

A condição de Dirichlet é utilizada para segmentos de fronteira em que o potencial elétrico ou magnético é constante (em geral igual a zero). Neste caso, o campo é paralelo ao segmento de fronteira. Na maioria das vezes, a condição de Dirichlet nula é usada para definir as fronteiras externas do modelo.

A condição de Neumann é válida para segmentos de fronteira em que a variação do potencial na direção perpendicular à fronteira é igual a zero. Neste caso, a indução é perpendicular ao segmento em questão. A condição de fronteira de Neumann especifica os valores que a derivada de uma solução deve tomar na fronteira do domínio. A condição de Neumann também está relacionada com as linhas de simetria de uma dada estrutura. Se na geometria existe uma linha de simetria é possível realizar a simulação apenas de uma metade da estrutura, tornando a linha de simetria numa linha de fronteira tipo Neumann [Bastos03, Sadiku04]. Na Figura A3.1 são apresentados casos de aplicação de condições de fronteira de Dirichlet e de Neumann.

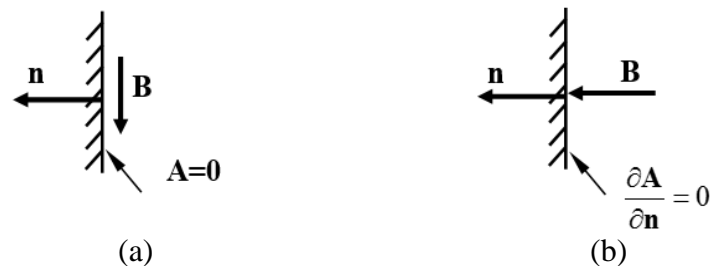


Figura A3.1 – Condições de fronteira de Dirichlet (a) e de Neumann (b).

Na Figura A3.2 são apresentados uma superfície  $\Sigma$  entre os dois meios contínuos,  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ .

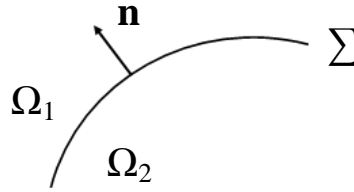


Figura A3.2 – Superfície  $\Sigma$  entre dois meios  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ .

Condições de fronteira entre dois meios para as componentes tangenciais de  $\mathbf{H}$  e de  $\mathbf{E}$  são dadas por [Bastos03, Sadiku04]:

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0 \quad (\text{A.20})$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{J}_f \quad (\text{A.21})$$

Condições de fronteira para a componente normal de  $\mathbf{B}$  são dadas por:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \quad (\text{A.22})$$

sendo  $\mathbf{n}$  o vetor normal à fronteira  $\Sigma$  do meio  $\Omega_2$  para o meio  $\Omega_1$ ,  $\mathbf{J}_f$  a densidade de corrente da fonte,  $\mathbf{H}_1$  e  $\mathbf{H}_2$  os campos magnéticos no meio  $\Omega_1$  e no meio  $\Omega_2$ ,  $\mathbf{B}_1$  e  $\mathbf{B}_2$  densidade de fluxo magnético no meio  $\Omega_1$  e no meio  $\Omega_2$ , respetivamente.

Na ausência de densidade de corrente da fonte  $\mathbf{J}_f$  entre dois meios a equação (4.36) é dada por:

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = 0 \quad (\text{A.23})$$

Dessa forma a componente tangencial de  $\mathbf{H}$  é contínua através da fronteira entre os dois meios, i.e.,  $\mathbf{H}_t$  não sofre nenhuma alteração na fronteira. Por sua vez, a componente tangencial do campo elétrico  $\mathbf{E}$  e a componente normal de indução magnética  $\mathbf{B}$  são contínuas através de superfície  $\Sigma$  entre os dois meios, i.e., não sofrem nenhuma descontinuidade na fronteira [Sadiku04].

